

**SVEUČILIŠTE U ZAGREBU  
FAKULTET PROMETNIH ZNANOSTI  
ODBOR ZA ZAVRŠNI RAD**

Zagreb, 24. travnja 2017.

Zavod: **Zavod za zračni promet**  
Predmet: **Osnove tehnike zračnog prometa**

**ZAVRŠNI ZADATAK br. 3979**

Pristupnik: **Stella Šimunić (0035193699)**  
Studij: **Promet**  
Smjer: **Zračni promet**

Zadatak: **Primjena naprednih kompozitnih materijala u konstrukciji zrakoplova**

**Opis zadatka:**

U uvodnim postavkama potrebno je definirati predmet istraživanja, objasniti svrhu i cilj istraživanja, dati osvrt na dosadašnja istraživanja te ukratko prikazati kompoziciju rada.

Definirati ulogu i osnovnu podjelu kompozitnih materijala. Ukazati na prednosti i nedostatke uporabe kompozitnih materijala u odnosu na konvencionalne materijale.

Na primjeru postojećih modela zrakoplova naći konkretnu primjenu nekog kompozitnog materijala i argumentirati prednosti korištenja tog materijala za primjenu na nekom dijelu strukture zrakoplova.

Izvesti konkretne zaključke i interpretirati rezultate istraživanja.

Zadatak uručen pristupniku: 28. travnja 2017.

Mentor:

Predsjednik povjerenstva za  
završni ispit:



izv. prof. dr. sc. Andrija Vidović

**SVEUČILIŠTE U ZAGREBU  
FAKULTET PROMETNIH ZNANOSTI**

**Stella Šimunić**

**PRIMJENA NAPREDNIH KOMPOZITNIH  
MATERIJALA U KONSTRUKCIJI ZRAKOPLOVA**

**ZAVRŠNI RAD**

Zagreb, rujan 2017.

**SVEUČILIŠTE U ZAGREBU  
FAKULTET PROMETNIH ZNANOSTI**

## **ZAVRŠNI RAD**

**PRIMJENA NAPREDNIH KOMPOZITNIH  
MATERIJALA U KONSTRUKCIJI ZRAKOPLOVA**

**APPLICATION OF ADVANCED COMPOSITE  
MATERIALS IN AIRCRAFT STRUCTURES**

Mentor: izv. prof. dr. sc. Andrija Vidović

Studentica: Stella Šimunić

JMBAG: 0035193699

Zagreb, rujan 2017.

## SAŽETAK

U ovom završnom radu opisani su kompozitni materijali, njihova podjela, struktura, proizvodnja i primjena. Svaka vrsta kompozitnih materijala ima svoje prednosti prema kojima su odabirani za korištenje u konstrukcijama zrakoplova. Najširu primjenu imaju kompozitni materijali ojačani vlaknima i složeni kompoziti kao što su laminati i sendvič konstrukcije. Također bitni kompozitni materijali za primjenu u zrakoplovstvu su kompoziti ojačani česticama i hibridni kompoziti. Najbolji primjer prednosti koje kompozitni materijali donose u zrakoplovnu industriju su putnički zrakoplovi Airbus A380 i Boeing B787, borbeni zrakoplov Lockheed Martin F-35 Lightning II i letjelica generalne avijacije Pipistrel Panthera.

KLJUČNE RIJEČI: *kompoziti; vrste kompozita; vlakna; čestice; kompoziti u zrakoplovstvu*

## SUMMARY

This final paper describes composite materials and their classification, structure, production and application. Each type of composite material has its advantages according to which is used in aircraft construction. Mostly used composite materials are fibre reinforced composites and complex composites such as laminates and sandwich constructions. In addition, essential composite materials for aerospace applications are particle reinforced composites and hybrid composites. The best example of the benefits that composite materials bring to the aviation industry are Airbus A380 and Boeing B787, fighter aircraft Lockheed Martin F-35 Lightning II and general aviation airplane Pipistrel Panthera.

KEY WORDS: *composites; composite classification; fibres; particles; composites in aviation*

## Sadržaj:

1.	Uvod .....	1
2.	Općenito o kompozitnim materijalima .....	3
2.1.	Osnovna podjela kompozita .....	4
2.2.	Prednosti kompozitnih materijala .....	4
2.3.	Nedostaci kompozita .....	5
3.	Kompozitni materijali ojačani vlaknima .....	6
3.1.	Karakteristike vlaknima ojačanih kompozita .....	6
3.2.	Materijali matrica i vlakana .....	7
3.3.	Svojstva i primjena kompozita ojačanih vlaknima .....	9
3.3.1.	Kompoziti sa polimernom matricom i staklenim vlaknima .....	10
3.3.2.	Kompoziti s polimernom matricom i aramidnim vlaknima .....	10
3.3.3.	Kompoziti s polimernim matricama i ugljičnim vlaknima .....	10
3.3.4.	Ugljik-ugljik kompoziti .....	11
3.4.	Proizvodnja i prerada .....	12
4.	Kompozitni materijali ojačani česticama .....	15
4.1.	Kompoziti s disperzijom .....	15
4.2.	Kompoziti s velikim česticama .....	16
4.3.	Primjena kompozita ojačanih česticama .....	17
5.	Složeni kompoziti .....	18
5.1.	Slojeviti kompoziti (laminati) .....	18
5.2.	Sendvič konstrukcije .....	20
6.	Hibridni kompoziti .....	22
7.	Primjena kompozitnih materijala na suvremenim zrakoplovima .....	24
7.1.	Airbus A380 .....	24
7.2.	Boeing 787 Dreamliner .....	27
7.3.	Lockheed Martin F-35 Lightning II .....	29
7.4.	Zrakoplovi Pipistrel .....	30
8.	Zaključak .....	31
	Literatura .....	32
	Popis slika .....	33
	Popis grafikona .....	34
	Popis tablica .....	34

## 1. Uvod

Kompozit ili kompozitni materijal građen je od međusobno čvrsto povezanih različitih materijala s fizikalnim i kemijskim svojstvima koje niti jedan poznati materijal sam za sebe ne može imati. Poboljšana su svojstva poput specifične čvrstoće i specifičnog modula elastičnosti, lomne žilavosti, toplinske postojanosti i otpornosti na pucanje. To su glavni razlozi za razvijanje ove vrste materijala, ali uz njih veliku važnost ima cijena. Postoje mnoge vrste kompozita, od jednostavnijih poput armiranog betona do složenih konstrukcija s različitim vrstama vlakana poput ugljičnih i staklenih unutar polimerne matrice. U ovom radu bit će detaljno opisane vrste kompozitnih materijala i njihova upotreba u zrakoplovstvu.

Predmet istraživanja prikaz i mogućnosti primjene kompozitnih materijala, te njihova podjela i primjena. Svrha ovog rada je prikazati kako primjena kompozitnih materijala poboljšava načine konstruiranja zrakoplova, te razlike između učinkovitosti kompozitnih i konvencionalnih materijala te ukazati na prednosti i nedostatke kompozitnih materijala. Cilj istraživanja je prikazati kako kompozitni materijali utječu na uprijeđenje suvremenih zrakoplova.

Rad se sastoji od osam poglavlja, kako slijedi:

1. Uvod
2. Općenito o kompozitnim materijalima
3. Kompozitni materijali ojačani vlaknima
4. Kompozitni materijali ojačani česticama
5. Složeni kompoziti
6. Hibridni kompoziti
7. Primjena kompozitnih materijala na suvremenim zrakoplovima
8. Zaključak

U uvodnom dijelu predstavljeni su predmet, svrha i cilj istraživanja, te ukratko su opisana sljedeća poglavlja.

U sljedećoj cjelini govori se općenito o kompozitnim materijalima, o osnovnoj podjeli kompozita prema materijalima od kojih su napravljene matrice i ojačala, te podjeli prema vrsti ojačala i strukturi. Također su navedene prednosti i nedostaci ovih suvremenih materijala.

Treća cjelina govori o kompozitnim materijalima ojačanim vlaknima koji su najraširenija skupina kompozita. Opisani su načini na koje vlakna mogu biti raspoređena unutar matrice, od kojih su materijala vlakna i matrice, njihova svojstva te načini proizvodnje i prerade. Detaljnije su opisani kompoziti s vlaknima koji imaju široku primjenu kao što su kompoziti s polimernom matricom i staklenim, aramidnim ili ugljičnim vlaknima, te inovativni ugljik-ugljik kompoziti.

U četvrtoj cjelini predstavljeni su kompoziti ojačani česticama koji se dijele na one s disperziranim i krupnim česticama. Takva vrsta kompozita najviše se koristi u izradi tvrdih metala, abraziva i električnih kontakata.

Složeni odnosno strukturni kompoziti opisani su u petoj cjelini. U tu skupinu spadaju laminati i sendvič konstrukcije. U zrakoplovstvu su od najveće važnosti GLARE (engl. *Glass reinforced aluminum*) laminati čija je konstrukcija i proizvodnja opisana u ovom poglavlju.

Šesta cjelina je o hibridnim kompozitima koji su inovacija na ovom području. Uglavnom se sastoje od više vrsta vlakana raspoređenih u različitim smjerovima unutar matrice.

U zrakoplovnoj industriji sve se više okreće prema korištenju novih vrsta materijala koji poboljšavaju aerodinamička svojstva, čine sam zrakoplov laganijim odnosno ekonomičnijim i ekološki prihvatljivijim. Detaljnije su opisane karakteristike zrakoplova i korišteni materijali na putničkim zrakoplovima Airbus A380 i Boeing 787 Dreamliner, borbenom zrakoplovu Lockheed Martin F-35 Lightning II i malenom zrakoplovu generalne avijacije Panthera koji je proizvod tvrtke Pipistrel.

U zaključnom dijelu iznesene su najbitne stavke iz cijelog rada te objedinjeni zaključci ovog istraživanja.



## 2. Općenito o kompozitnim materijalima

Kompozitni materijali ili ukratko kompoziti proizvedeni su umjetnim spajanjem dvaju ili više materijala različitih svojstava s ciljem dobivanja materijala takvih svojstava kakva na posjeduje niti jedna komponenta sama za sebe.<sup>1</sup> Spajanjem materijala kao rezultat se dobije kompozit s poboljšanim svojstvima poput čvrstoće, krutosti, težine, ponašanja pri visokim temperaturama, kemijska postojanost, tvrdoća i električna ili toplinska vodljivost.

Različiti dijelovi, odnosno elementi zrakoplova konstruiraju se prema posebnim uvjetima rada i opterećenja, te se materijal za izradu tih elemenata izabire upravo prema tim uvjetima. Svaki element zrakoplova izložen je drugačijim silama koje djeluju na njegovu konstrukciju, te je bitno da se pravilno odabere materijal prema opterećenjima koje podnosi. Čvrstoća je sposobnost materijala da bez otkaza podnese i odupre se djelovanju vanjske primjene sile i jedna je od osnovnih karakteristika koje određuju izbor materijala. Ostale bitne karakteristike koje se razmatraju uz čvrstoću su elastičnost, plastičnost, rastezljivost (žilavost) i krutost. Elastičnost je sposobnost materijala da se povрати u početni oblik i dimenzije nakon što na njega prestanu djelovati sile. U slučaju da su djelujuće sile prevelike dolazi do prekoračenja granice elastičnosti i nastupa trajna deformacija, odnosno materijal se neće povratiti u početni oblik. Plastična deformacija je prelazak materijala preko spomenute granice elastičnosti. Rastezljivost (žilavost) je sposobnost materijala da se deformira bez pucanja. Krutost je obrnuta od rastezljivosti. Kruti materijal ne može promijeniti oblik pri djelovanju opterećenja.<sup>2</sup>

Primjena kompozitnih materijala u zrakoplovstvu uvjetovana je niskom gustoćom, visokom čvrstoćom i krutošću s obzirom na gustoću kao i odličnim fizikalnim svojstvima. Uporabom kompozitnih materijala u izradi zrakoplovnih konstrukcija značajno se može smanjiti težina zrakoplova i time ostvariti manja potrošnja goriva ili je moguće povećati korisnu nosivost što kao rezultat ima manje troškove, odnosno veću isplativost. Kao takvi predstavljaju alternativu tradicionalnim materijalima u izradi konstrukcijskih elemenata kao što su oplata krila i trupa te brojni drugi elementi zrakoplova.<sup>3</sup>

---

<sup>1</sup> Filetin, T., Kovačiček, F., Indof, J.: Svojstva i primjena materijala, FSB, Zagreb, 2011., str. 231 (09.06.2017.)

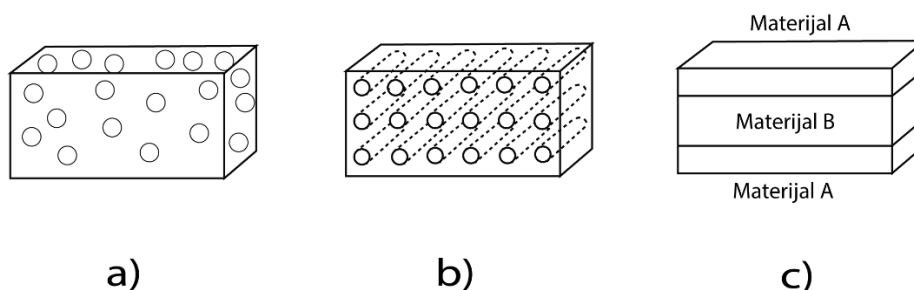
<sup>2</sup> Steiner, S., Vidović, A., Bajor, I., Pita, O., Štimac, I.: Zrakoplovna prijevozna sredstva, FPZ, Zagreb, 2008., str. 140.

<sup>3</sup> Ćorić, D., Filetin, T.: Materijali u zrakoplovstvu, FSB, Zagreb, 2010., str. 112

## 2.1. Osnovna podjela kompozita

Kompoziti su višefazni materijali, što znači da u osnovi sadrže matricu i ojačalo. Matrica je kontinuirana faza, a ostale faze (ojačala) okružene su matricom. Prema materijalima matrice i dodatka kompoziti mogu biti: metalno-metalni, metalno-keramički, metalno-polimerni, keramičko-keramički, keramičko-polimerni, polimerno-polimerni i polimerno-metalni.<sup>4</sup>

Ukupno ponašanje kompozita određeno je svojstvima materijala matrice i ojačala, veličinom i rasporedom konstituenata, volumnim udjelom konstituenata, oblikom konstituenata te prirodom i jakošću veza između konstituenata. Prema vrsti ojačala razlikuju se kompoziti ojačani česticama, kompoziti ojačani vlaknima, slojeviti kompoziti i sendvič konstrukcije.<sup>5</sup> Ti osnovni tipovi kompozitnih materijala prikazani su na slici 1.



Slika 1. Osnovni tipovi kompozita: (a) kompoziti s česticama; (b) kompoziti s vlaknima; (c) slojeviti kompoziti

Izvor: Filetin, T., Kovačićek, F., Indof, J.: Svojstva i primjena materijala, FSB, Zagreb, 2011., str. 231

## 2.2. Prednosti kompozitnih materijala

U odnosu na tradicionalne materijale kompoziti posjeduju brojne prednosti:

- Otpornost na koroziju
- Mala gustoća i mala masa
- Povoljan odnos čvrstoće i gustoće (specifična čvrstoća)
- Povoljan odnos modula elastičnosti i gustoće (specifična krutost)
- Mogućnost proizvodnje dijelova složenog oblika
- Jednostavno i jeftino održavanje
- Dulji vijek trajanja
- Mogućnost „dizajniranja“ svojstva<sup>6</sup>

Zbog manje težine materijala smanjuje se i ukupna težina zrakoplova što rezultira manjom potrošnjom goriva i povećanom korisnom nosivosti. Sljedeća je prednost kompozita mogućnost njihova oblikovanja u izratke složenog oblika čime

<sup>4</sup> Filetin, T., Kovačićek, F., Indof, J.: Svojstva i primjena materijala, FSB, Zagreb, 2011., str. 231

<sup>5</sup> Ćorić, D., Filetin, T.: Materijali u zrakoplovstvu, FSB, Zagreb, 2010., str. 113

<sup>6</sup> Ćorić, D., Filetin, T.: Materijali u zrakoplovstvu, FSB, Zagreb, 2010., str. 112

se smanjuje ne samo broj pozicija nekog sklopa, već i potreba za pričvršćivanjem i spajanjem. Manji broj pozicija skraćuje vrijeme potrebno za montažu, ali se smanjuje i broj potencijalno opasnih mjesta iniciranja pukotine budući da elementi kao što su vijci i različiti provrti djeluju kao koncentratori naprezanja. U odnosu na tradicionalne konstrukcijske materijale su manje osjetljivi na pojavu različitih oblika oštećenja što doprinosi njihovoj trajnosti.<sup>7</sup>

### 2.3. Nedostaci kompozita

Svaki materijal ima svoje određene nedostatke pa tako i kompozitni materijali. Kompoziti su krhkiji od konvencionalnih materijala i zbog toga se lakše oštete. Jedan od većih nedostataka kompozita je teško otkrivanje oštećenja i pukotina, odnosno oštećenja je gotovo nemoguće uočiti vizualno. Popravak tih oštećenja donosi niz problema zato što je kompozite potrebno transportirati i skladištiti u klimatiziranim vozilima odnosno prostorima.

Mnoga oštećenja moguće je popraviti vrućim stvrdnjavanjem za koje je potrebna posebna oprema, a sušenje vrućim ili hladnim zrakom oduzima mnogo vremena.<sup>8</sup> U slučaju sudara zrakoplova ili pada zrakoplova kompozitni materijali se lakše zapale i raspadaju u sitnije dijelove. Sljedeći nedostatak je delaminacija, pojava odvajanja slojeva materijala zbog nakupljanja vlage.

Kompoziti su relativno novi materijali čija je cijena izrazito visoka zbog troškova proizvodnje, te njihova cijena konstantno raste. Cijena se pokušava regulirati korištenjem materijala koji su jeftiniji poput stakla, pa su tako nastali novi kompozitni materijali poput složenih i hibridnih kompozita.

---

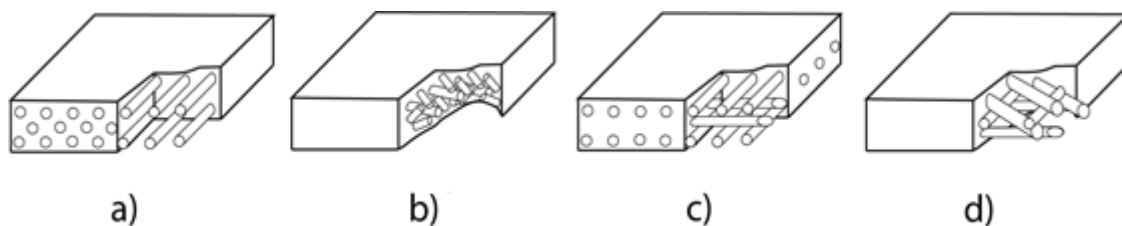
<sup>7</sup> Ćorić, D., Filetin, T.: Materijali u zrakoplovstvu, FSB, Zagreb, 2010., str. 112

<sup>8</sup>[http://www.ae.metu.edu.tr/~ae469/Advantages%20and%20Disadvantages%20of%20Composite%20Materials\\_Resin%20Systems.pdf](http://www.ae.metu.edu.tr/~ae469/Advantages%20and%20Disadvantages%20of%20Composite%20Materials_Resin%20Systems.pdf), kolovoz 2017.

### 3. Kompozitni materijali ojačani vlaknima

Vlakna koja se koriste kao ojačala u ovoj vrsti kompozitnih materijala mogu biti u obliku vlakana ili žica izrađenih od tipičnih materijala kao što su čelik, molibden i volfram. Još jedan oblik vlakana koja se koriste su viskeri. Viskeri su vrlo tanke niti keramičkih monokristala visoke čistoće s velikim omjerom duljine i promjera. Ovisno o materijalu vlakna ona prema svojim karakteristikama mogu biti čvrsta, kruta i krhka. Kada se ona ugrađuju u matricu koja je mekanija i duktilnija dolazi do poboljšanja karakteristika kompozitnog materijala zbog prenošenja opterećenja s matrice na vlakna. U tom slučaju vlakna nose veći dio opterećenja te takvi kompoziti su čvršći, žilaviji, krući te imaju povećan omjer čvrstoće i gustoće.

Vlakna mogu biti različito usmjerena unutar matrice. Kao što je prikazano na slici 2., vlakna su raspoređena kontinuirano u jednom smjeru (a), slučajno usmjerena diskontinuirana (b), ortogonalno raspoređena (c) i višesmjerno usmjerena (d).<sup>9</sup> O tom rasporedu ovise svojstva kompozita. Tako je na primjer, kod kontinuiranih jednosmjernih vlakana čvrstoća vrlo visoka u smjeru pružanja vlakana, a okomito na njih značajno niža.



*Slika 2. Rasporedi vlaknastih ojačala*

*Izvor: Filetin, T., Kovačiček, F., Indof, J.: Svojstva i primjena materijala, FSB, Zagreb, 2011.*

#### 3.1. Karakteristike vlaknima ojačanih kompozita

Najvažnije karakteristike pri izboru kompozitnih materijala za konstrukcije su omjer duljine i promjera vlakana, volumni udio vlakana, usmjerenost vlakana, svojstva vlakana i svojstva matrice.

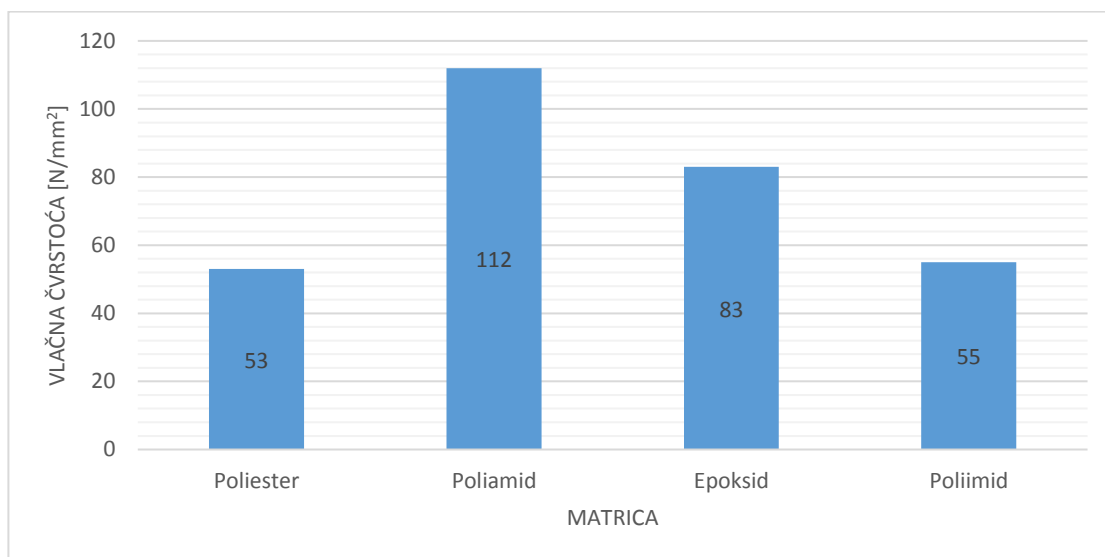
Kontinuirana vlakna se teže ugrađuju u matrice ali imaju najbolja svojstva, a diskontinuirana vlakna s velikim omjerom duljine i promjera se lakše ugrađuju u matrice te se dobiva materijal s visokom krutosti i čvrstoćom. Čvrstoća i krutost kompozita ovise o volumnom udjelu vlakana. Gornja granica iznosi oko 40% i određena je mogućnošću da se vlakna okruže materijalom matrice. Jednosmjerna vlakna najbolje podnose opterećenje koje je paralelno s vlaknima, dok veliko opterećenje okomito na smjer vlakana može dovesti do deformacije pa čak i pucanja materijala. Da bi se postigla jednoličnija svojstva materijala vlakna se mogu polagati ortogonalno ili pod nekim drugim kutem, ali se tako smanjuje

<sup>9</sup> Filetin, T., Kovačiček, F., Indof, J.: Svojstva i primjena materijala, FSB, Zagreb, 2011., str. 242

čvrstoća. Vlakna bi trebala biti čvrsta, kruta, lagana i imati visoko talište te visok specifični modul elastičnosti. Materijali matrice moraju biti žilavi i duktilni tako da mogu prenositi opterećenja s matrice na vlakna.<sup>10</sup>

### 3.2. Materijali matrica i vlakana

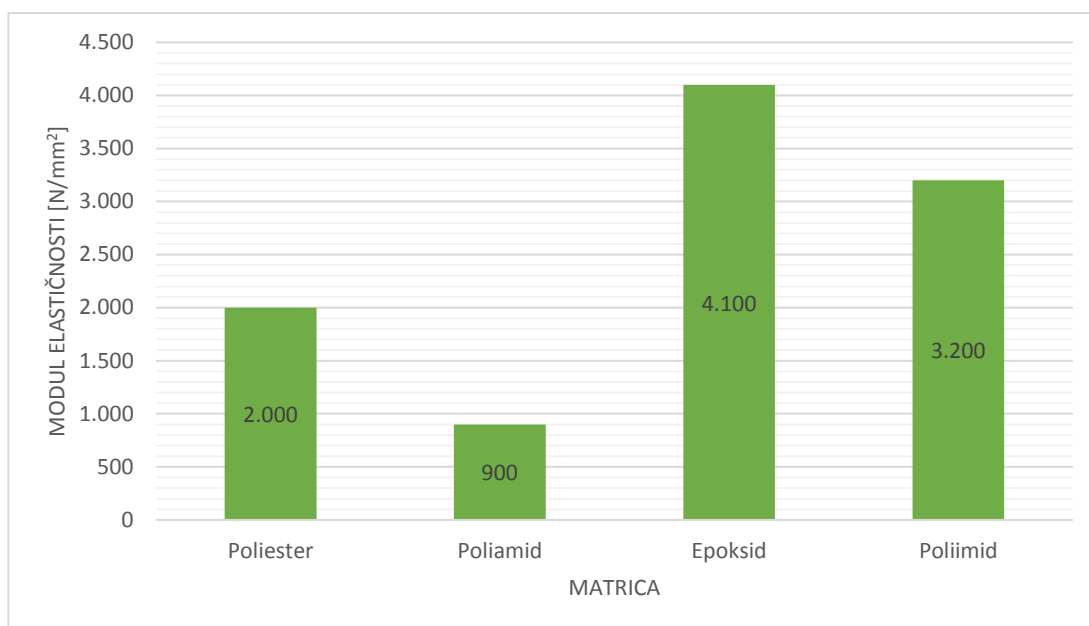
Glavne funkcije matrice su povezivanje vlakana i zaštita pojedinih vlakana od površinskih oštećenja. Matrica služi kao medij koji prenosi vanjska naprezanja na vlakna. Najvažnija osobina matrice je njezina duktilnost, te su zato matrice uglavnom napravljene od metala i polimera. S obzirom na ponašanje pri povišenim temperaturama polimerne matrice mogu se podijeliti na plastomerne i duromerne. Plastomerne matrice se mijenjaju pri povišenim temperaturama, a duromerne se ne mijenjaju. Zbog tog svojstva se duromerne matrice koriste za zahtjevnije strukturne primjene. Primjer takvog materijala je epoksidna smola koja je otporna na vlagu i ima bolja mehanička svojstva u odnosu na plastomerne matrice. Poliamidi su novo razvijeni plastomeri koji su postojani pri visokim temperaturama i imaju potencijal za buduće primjene u zrakoplovstvu i zamjenu epoksidne smole.<sup>11</sup> Na grafikonu 1. vidi se iznos vlačne čvrstoće kod matrica od poliestera, poliamida, epoksida i poliiimida. Najveću vlačnu čvrstoću ima poliamid i ona iznosi 122 N/mm<sup>2</sup>, a epoksidna smola ima vlačnu čvrstoću od 83 N/mm<sup>2</sup>. Na grafikonu 2. je prikazan modul elastičnosti kod istih materijala. Epoksidna smola ima najveći modul elastičnosti i on iznosi 4.100 N/mm<sup>2</sup>, a modul elastičnosti poliamida je najniži od ova četiri materijala i iznosi 900 N/mm<sup>2</sup>.



*Grafikon 1. Prikaz vlačne čvrstoće različitih vrsta matrica*  
Izvor: Ćorić, D., Filetin, T.: Materijali u zrakoplovstvu, FSB, Zagreb, 2010.

<sup>10</sup> Filetin, T., Kovačiček, F., Indof, J.: Svojstva i primjena materijala, FSB, Zagreb, 2011., str. 245

<sup>11</sup> Ćorić, D., Filetin, T.: Materijali u zrakoplovstvu, FSB, Zagreb, 2010., str. 115



*Grafikon 2. Prikaz modula elastičnosti različitih vrsta matrica*  
 Izvor: Čorić, D., Filetin, T.: *Materijali u zrakoplovstvu*, FSB, Zagreb, 2010.

Matrice mogu biti i keramičke ali one moraju biti ojačane (armirane) u cilju osiguranja lomne žilavosti. Čvrstoća kompozita uvelike ovisi o vezama između matrice i vlakana. Te veze moraju biti dovoljno jake da umanje izvlačenje vlakana i da uspješno prenesu naprezanja sa slabe matrice na jaka vlakna.<sup>12</sup>

Vlakna su sastavna komponenta kompozita i njihova funkcija je povećati čvrstoću i krutost kompozitnog materijala. Prema promjeru i karakteru vlakna se dijele u tri skupine: viskeri, vlakna i žice. Viskeri su izrazito mali monokristali koji imaju ekstremno velik omjer između promjera i duljine. Kod viskera nema mogućnosti tečenja zbog čega imaju visoku čvrstoću, odnosno viskeri su najčvršći poznati materijal. Njihovi najveći nedostaci su vrlo visoka cijena i to što ih je teško, to jest ponekad gotovo nemoguće ugraditi u matricu. Viskeri mogu biti od grafita (ugljika), silicijeva karbida (SiC), silicijeva nitrida (Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub>) i aluminijskog oksida (Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>). Druga skupina su vlakna koja su ili polikristalna ili amorfna i imaju mali promjer. Obično su polimerna ili keramička, to jest vlaknasti materijal je od polimer aramida (Kevlar), stakla, Ugljika, bora, aluminijskog oksida ili silicijevog karbida. Žice su relativno velikog promjera, a najčešći materijali od kojeg su napravljene su čelik, molibden i volfram.<sup>13</sup> U tablici 1. navedene su vrijednosti gustoće, vlačne čvrstoće i modula elastičnosti za spomenute materijale.

<sup>12</sup> Filetin, T., Kovačiček, F., Indof, J.: *Svojstva i primjena materijala*, FSB, Zagreb, 2011., str. 248

<sup>13</sup> Filetin, T., Kovačiček, F., Indof, J.: *Svojstva i primjena materijala*, FSB, Zagreb, 2011., str. 249

Tablica 1. Vrijednosti svojstava nekih ojačivača

Materijal	Gustoća [kg/m <sup>3</sup> ]	Vlačna čvrstoća [N/mm <sup>2</sup> ]	Modul elastičnosti [kN/mm <sup>2</sup> ]
<b>Viskeri</b>			
Grafit	2.200	20.700	700
Silicijev nitrid	3.200	5.000 – 7.000	350 – 380
Aluminijev oksid	4.000	10.000 – 20.000	700 – 1.500
Silicijev karbid	3.200	20.000	480
<b>Vlakna</b>			
Aluminijev oksid	3.950	1.380	379
Aramid (Kevlar)	1.440	3.600 – 4.100	131
Ugljik	1.780 – 2.150	1.500 – 4.800	228 – 724
Staklo	2.580	3.450	72,5
Bor	2.570	3.600	400
Silicijev karbid	3.000	3.900	400
<b>Žice</b>			
Čelik	7.900	2.390	210
Molibden	10.200	2.200	324
Volfram	19.300	2.890	407

Izvor: Filetin, T., Kovačiček, F., Indof, J.: Svojstva i primjena materijala, FSB, Zagreb, 2011.

### 3.3. Svojstva i primjena kompozita ojačanih vlaknima

Najčešći kompoziti ojačani vlaknima su oni koji sadrže polimerne matrice i ojačala poput stakla, aramida i ugljika. Posebna vrsta ovih kompozita su ugljični kompoziti koji imaju i matricu i ojačala od ugljika.

Kompoziti s metalnim matricama najčešće su ojačani kontinuiranim vlaknima od ugljika, silicijevog karbida, bora, aluminijske i tvrdih metala ili su ojačani diskontinuiranim viskerima od silicijevih karbida, sjeckana vlakna od ugljika i aluminijske. Takvi kompoziti su lagani, otporni na trošenje i toplinski postojani. U zrakoplovstvu se primjenjuju aluminijeve legure ojačane vlaknima bora i aluminijeve legure ojačane kontinuiranim ugljičnim vlaknima. Od ove dvije vrste kompozitnih materijala izrađeni su letjelica Space Shuttle Orbiter i teleskop Hubble Telescope.<sup>14</sup>

Keramičke matrice imaju vrlo malu žilavost i sklone su pucanju te se zbog toga u njih ugrađuju najčešće keramički viskeri od silicijevih karbida i silicijevih nitrida. Povećanjem udjela vlakana i viskera uzrokuje se povećanje čvrstoće i lomne žilavosti. Ovakvi kompoziti pokazuju izuzetnu otpornost na puzanje i otpornost na toplinske šokove.<sup>15</sup>

<sup>14</sup> Filetin, T., Kovačiček, F., Indof, J.: Svojstva i primjena materijala, FSB, Zagreb, 2011., str. 255

<sup>15</sup> Filetin, T., Kovačiček, F., Indof, J.: Svojstva i primjena materijala, FSB, Zagreb, 2011., str. 256



### 3.3.1. Kompoziti s polimernom matricom i staklenim vlaknima

Polimerni kompoziti se najčešće ojačavaju sa staklenim vlaknima zato što se staklo lako izvlači iz rastaljenog stanja u oblik vlakana, proizvodnja je ekonomična i ugrađivanjem tih vlakana dobiva se kompozit visoke čvrstoće. Staklena vlakna su bijele ili prozirne boje i karakteriziraju ih visoka čvrstoća ali i smanjena krutost. Uporaba ovih kompozita uvjetovana je temperaturom do 200°C, iznad koje dolazi do tečenja stakla i gubljenja svojstava. U konstrukciji zrakoplova koriste se visokočista staklena vlakna u kombinaciji s visokotemperaturnom polimernom matricom (poliimidne smole) koji podnose temperature do 300°C.<sup>16</sup> Od ovog kompozita najčešće se izrađuju kućišta (kabine) vozila i trupovi. U transportnoj industriji koriste se zbog toga što smanjuju težinu vozila i povećava djelotvornost transporta.<sup>17</sup>

### 3.3.2. Kompoziti s polimernom matricom i aramidnim vlaknima

Aramidna vlakna nazivaju se još i Kevlar ili Nomex. Ova vlakna počela su se primjenjivati 1970-ih godina, a poželjna su zbog visoke čvrstoće i krutosti, otpornosti na udar, otpornosti na puzanje, otpornosti umoru materijala. Aramidi su također otporni na zapaljenje i stabilni su na vrlo visokim temperaturama, to jest zadržavaju svoja svojstva na temperaturama od -200° C do 200°C iako spadaju u skupinu plastomera. Nedostatak je to što su podložni degradaciji s jakim kiselinama i lužinama.<sup>18</sup> Ova vlakna su žute boje, imaju relativno slabe adhezijske veze s matricom, nemagnetična su, osjetljiva su na ultraljubičasto zračenje i skuplja su od staklenih vlakana.

### 3.3.3. Kompoziti s polimernim matricama i ugljičnim vlaknima

Ugljičnim vlaknima najčešće se ojačavaju suvremeni polimerni kompoziti zbog toga što ugljična vlakna imaju najveću specifičnu krutost i najveću specifičnu čvrstoću od svih vlaknastih ojačala, imaju i visoki vlačni modul elastičnosti i visoku čvrstoću koje zadržavaju i pri povišenim temperaturama, vlakna su otporna na vlagu i niz otapala, kiselina i lužina, te je njihova proizvodnja relativno jeftina. Prema krutosti ova vlakna se mogu podijeliti u 4 skupine:

- tip sa standardnim modulom elastičnosti (220 GPa)
- tip sa srednjim ili prijelaznim modulom elastičnosti (240 GPa)
- tip s visokim modulom elastičnosti (300 GPa)
- tip s ultravisokim modulom elastičnosti (450 GPa)<sup>19</sup>

Za ojačavanje koriste se ugljična vlakna promjera od 4μm do 10μm koja su ili kontinuirana ili rezana. Da bi se poboljšala adhezija s polimernom matricom ugljična vlakna se prevlače epoksidnim slojem. Ovakvi kompoziti koriste se za

<sup>16</sup> Ćorić, D., Filetin, T.: Materijali u zrakoplovstvu, FSB, Zagreb, 2010., str. 116

<sup>17</sup> Filetin, T., Kovačiček, F., Indof, J.: Svojstva i primjena materijala, FSB, Zagreb, 2011., str. 251

<sup>18</sup> Filetin, T., Kovačiček, F., Indof, J.: Svojstva i primjena materijala, FSB, Zagreb, 2011., str. 253

<sup>19</sup> Ćorić, D., Filetin, T.: Materijali u zrakoplovstvu, FSB, Zagreb, 2010., str. 116



izradu namotanih kućišta raketnih motora i konstrukcijskih dijelova vojnih i komercijalnih letjelica, na primjer dijelovi krila, trupa, stabilizatora i komponenti za upravljanje.<sup>20</sup>

U tablici 2. prikazana je usporedba vrijednosti gustoće, modula elastičnosti i vlačne čvrstoće kod staklenih, aramidnih i ugljičnih vlakana. Najveću vlačnu čvrstoću imaju ugljična vlakna sa srednjim modulom elastičnosti, najveći modul elastičnosti ugljična vlakna s ultravisokim modulom elastičnosti, a najmanju gustoću imaju aramidna vlakna s niskim modulom elastičnosti.

Tablica 2. Svojstva vlakana

Vlakno	Gustoća [g/cm <sup>3</sup> ]	Modul elastičnosti [N/mm <sup>2</sup> ]	Vlačna čvrstoća [N/mm <sup>2</sup> ]
<b>Staklena vlakna</b>			
E-vlakno	2,54	76.000 – 79.000	3.100 – 3.800
S-vlakno	2,48	88.000 – 91.000	4.400
<b>Aramidna vlakna</b>			
Niski modul elastičnosti	1,39	70.000	3.000
Srednji modul elastičnosti	1,45	121.000	3.100
Visoki modul elastičnosti	1,47	179.000	3.500
<b>Ugljična vlakna</b>			
Standardni modul elastičnosti	1,74	228.000	3.600
Srednji modul elastičnosti	1,82	294.000	7.100
Ultravisoki modul elastičnosti	2,18	966.000	3.100

Izvor: Čorić, D., Filetin, T.: *Materijali u zrakoplovstvu*, FSB, Zagreb, 2010.

#### 3.3.4. Ugljik-ugljik kompoziti

Ugljična matrica ojačana ugljičnim vlaknima jedan je od najnaprednijih materijala. Ovaj materijal je relativno nov i cijena mu je izrazito visoka zbog vrlo složenog postupka proizvodnje. Proizvodnja se sastoji od ugrađivanja čistih ugljičnih vlakana u piroliziranu ugljičnu matricu, odnosno kontinuirana ugljična vlakna se polažu tako da poprime odgovarajući dvodimenzionalni ili trodimenzionalni oblik slaganja te se tada vlakna impregniraju. Tijekom pirolize oslobađaju se i odvođe niskomolekularne komponente koje se sastoje od spojeva na osnovi kisika, vodika i dušika, a ostaju velike makromolekularne polimerne smole. Tada se proizvod oblikuje u konačni oblik. Zbog kompleksnosti postupka proizvodnje i izrazito visoke cijene ovi kompoziti nisu u širokoj primjeni. Karakteristike ugljik-ugljik kompozita su visok vlačni modul elastičnosti, visoka vlačna čvrstoća, otpornost puzanju i visoka lomna žilavost. Osim toga izražena je i mala toplinska rastezljivost i visoka toplinska vodljivost. Sva ova svojstva se ne

<sup>20</sup> Filetin, T., Kovačiček, F., Indof, J.: Svojstva i primjena materijala, FSB, Zagreb, 2011., str. 252

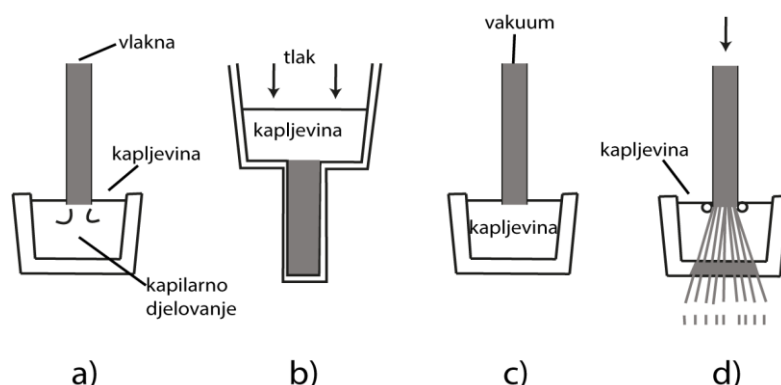
mijenjaju čak ni pri temperaturama višim od 2.000°C. Najveći nedostatak ovih kompozita je sklonost oksidaciji pri visokim temperaturama.<sup>21</sup>

Ovi kompoziti se koriste kod izrade raketnih motora kao materijali otporni na trošenje, kod izrade dijelova turbina i na konstrukcijama suvremenih vojnih zrakoplova.<sup>22</sup>

### 3.4. Produvodnja i prerada

Načini proizvodnje vlakana uvelike ovise o njihovom materijalu. Vlakna velikih promjera poput čeličnih šipki se proizvode valjanjem, a vlakna manjeg promjera kao što su žice se proizvode vučenjem. Konvencionalnim postupkom vučenja moguće je izvući žice od volframa, berilija, nehrđajućeg čelika ili poliamida. Materijali poput bora i ugljika su krhki i nije ih moguće izvući na taj način. Vlakna bora se proizvode neparivanjem, a vlakna ugljika karbonizacijom ili pirolizom. Neparivanje je postupak taloženja bora na žicu od volframa. Karbonizacija je postupak presvlačenja nekog organskog filameta ugljikom. Organski filament (prethodnik) je vučeno vlakno od poliamida, poliakrilonitrila ili katrana koji se u spomenutom procesu raspada i oslobađaju se svi elementi osim ugljika. Ako se temperatura karbonizacije povisi s 1.000°C na 3.000°C vlačna čvrstoća se smanjuje i modul elastičnosti se povećava.<sup>23</sup>

Načini proizvodnje kompozitnih materijala ojačanih vlaknima su lijevanje, deformiranje i difuzijsko povezivanje, pultrudiranjem, proizvodnjom preprega i namotavanjem. Postoje različiti postupci lijevanja, a ovise o načinu unošenja polimerne smole među vlakna. Kapljevinu se može lijevati kapilarnim djelovanjem, tlačno, vakuumskim infiltriranjem i kontinuirano. Na slici 3. su prikazani postupci lijevanja.<sup>24</sup>



Slika 3. Postupci lijevanja materijala: (a) kapilarno djelovanje, (b) tlačno lijevanje, (c) vakuumsko infiltriranje, (d) kontinuirano lijevanje

Izvor: Ćorić, D., Filetin, T.: Materijali u zrakoplovstvu, FSB, Zagreb, 2010., str. 121

<sup>21</sup> Filetin, T., Kovačićek, F., Indof, J.: Svojstva i primjena materijala, FSB, Zagreb, 2011., str. 257

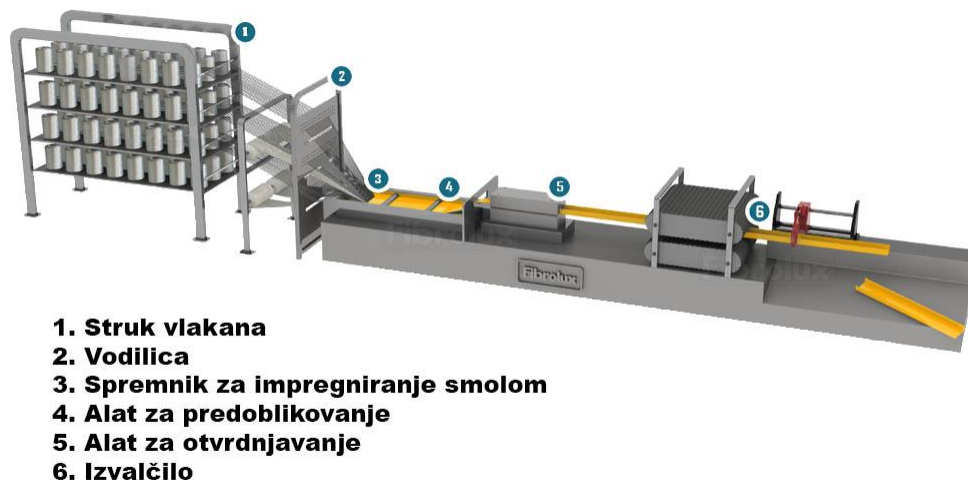
<sup>22</sup> Ćorić, D., Filetin, T.: Materijali u zrakoplovstvu, FSB, Zagreb, 2010., str. 129

<sup>23</sup> Filetin, T., Kovačićek, F., Indof, J.: Svojstva i primjena materijala, FSB, Zagreb, 2011., str. 259

<sup>24</sup> Ćorić, D., Filetin, T.: Materijali u zrakoplovstvu, FSB, Zagreb, 2010., str. 120

U postupke deformiranja spadaju prešanje i valjanje kojima se spajaju slojevi traka. Za uvođenje matrice među vlakna i spajanje vlakana povezanih u trake se koristi postupak difuzijskog povezivanja. Primjenom povišene temperature i tlaka dobivaju se zbijene folije kompozitnog materijala.<sup>25</sup>

Kompozitni materijali stalnog poprečnog presjeka ili oblika, a različitih duljina se proizvode postupkom pultrudiranja. Pultrudiranje se sastoji od provlačenja neuvijenog snopa kontinuiranih vlakana natopljenih duromernom smolom kroz čelični alat odgovarajućeg oblika. Sljedeći korak je provlačenje materijala kroz alat za otvrdnjavanje koji daje konačan oblik. Ovom metodom se proizvode kompoziti s poliesterskim, vinilesterskim i matricama od epoksidne smole ojačani staklom, ugljičnim ili aramidnim vlaknima.<sup>26</sup> Na slici 4. je prikazan postupak pultrudiranja.



*Slika 4. Postupak pultrudiranja*

*Izvor: <http://fibrolux.com/main/knowledge/pultrusion/>, kolovoz 2017.*

Prepreg je kontinuirano vlaknasto ojačalo koje je predimpregnirano s djelomično otvrdnutom polimernom smolom i jedan je od najviše korištenih materijala za konstrukcijske svrhe. Proizvodnja preprega započinje raspoređivanjem i slaganjem strukova u tzv. „sendvič“ koji se oblaže tankim slojevima odvajala i nosivog papira. Sljedeći korak je postupak kalandriranja, odnosno oblikovanja zagrijanim valjcima. Impregniranje vlakana se osigurava tako da se jedan sloj papira presvuče tankim slojem smole. Konačni proizvod je tanka traka kompozitnog materijala s kontinuiranim usmjerenim vlaknima. Ovim postupkom se proizvode kompoziti s plastomernim ili duromernim matricama ojačani ugljičnim, staklenim ili aramidnim vlaknima.<sup>27</sup>

Kompoziti se mogu proizvoditi i namotavanjem kontinuiranih vlakana na cilindrični model. Vlakna prije namotavanja moraju biti vođena kroz kupku koja sadrži smolu. Vrste namotavanja vlakana su vijčano, prstenasto (obodno) i polarno

<sup>25</sup> Filetin, T., Kovačiček, F., Indof, J.: Svojstva i primjena materijala, FSB, Zagreb, 2011., str. 261

<sup>26</sup> Filetin, T., Kovačiček, F., Indof, J.: Svojstva i primjena materijala, FSB, Zagreb, 2011., str. 262

<sup>27</sup> Filetin, T., Kovačiček, F., Indof, J.: Svojstva i primjena materijala, FSB, Zagreb, 2011., str. 263

i prikazana su na slici 5. Svojstva kompozitnih materijala ovise o načinu namotavanja. Sljedeći korak proizvodnje je otvrdnjavanje u peći ili na sobnoj temperaturi. Ovim postupkom dobivaju se materijali s vrlo velikim omjerom čvrstoće i gustoće i koriste se za izradu kućišta raketnih motora i spremnika.<sup>28</sup>



*Slika 5. Načini namotavanja vlakana*

*Izvor: <https://ninesights.ninesigma.com/rfps/-/rfp-portlet/rfpViewer/2892>, kolovoz 2017.*

---

<sup>28</sup> Ćorić, D., Filetin, T.: Materijali u zrakoplovstvu, FSB, Zagreb, 2010., str. 120

## 4. Kompozitni materijali ojačani česticama

Kompozitni materijali ojačani česticama najčešće se sastoje od mekane i duktilne matrice koja obavlja tvrde i krhke čestice. Njihova struktura je vrlo slična strukturi dvofaznih disperzijski ojačanih metalnih legura. Ova vrsta kompozitnih materijala se dijeli na dvije skupine prema veličini i rasporedu čestica, te prema volumnom udjelu čestica. Prva skupina su kompoziti s disperzijom čije čestice imaju promjer do 0,1  $\mu\text{m}$  i volumni udio iznosa 0,15. Kompoziti s velikim česticama su druga skupina i promjer njihovih čestica je veći od 1  $\mu\text{m}$ , a volumni udio iznosi 0,20.<sup>29</sup>

Razlika između kompozita ojačanih česticama i onih ojačanih vlaknima najvidljivija je u njihovim svojstvima. Kod kompozita s česticama čvrstoća i krutost su jednaka u svim smjerovima, dok kod kompozita s vlaknima ova svojstva variraju ovisno o smjeru opterećenja.<sup>30</sup>

### 4.1. Kompoziti s disperzijom

Karakteristično svojstvo čestica koje ojačavaju ovaj kompozitni materijal je mali promjer iznosa od 10 do 250 nm. Takve izrazito male čestice sprječavaju gibanje dislokacija i tako doprinose efektu ojačavanja materijala. Da bi materijal dostigao svoja najbolja svojstva potrebna je mala količina disperziranih čestica (do 15%). Kao što je spomenuto, ovi kompoziti dijele neka svojstva s dvofaznim metalnim legurama, te je jedno od izraženijih zajedničkih svojstava mala čvrstoća pri sobnoj temperaturi. Čvrstoća kompozita se postupno smanjuje s porastom temperature. Da bi se postigla stabilnost pri visokim temperaturama čestice u kompozitu ne smiju biti krupne. Također, kompoziti ojačani česticama imaju veću otpornost prema puzanju od dvofaznih metalnih legura.<sup>31</sup>

Svojstva kompozita s disperzijom mogu se optimirati uzimanjem u obzir sljedećih smjernica:

- Disperzirana (raspršena) faza, tipičan primjer je tvrd i stabilan oksid, treba biti djelotvorna zapreka klizanju (smicanju);
- Materijal koji služi kao disperzija treba biti optimalne veličine, oblika, raspodjele i udjela (količine);
- Disperzirani materijal treba biti male rastvorljivosti u materijalu matrice. Osim toga ne smije doći do kemijskih reakcija između dispergenata i matrice.
- Npr.  $\text{Al}_2\text{O}_3$  ne otapa se u aluminiju, dakle taj materijal je djelotvoran dispergent za legure aluminija; bakrov oksid se međutim pri povišenim temperaturama otapa u bakru, dakle sustav  $\text{Cu-Cu}_2\text{O}$  neće biti djelotvoran;

<sup>29</sup> Ćorić, D., Filetin, T.: Materijali u zrakoplovstvu, FSB, Zagreb, 2010., str. 123

<sup>30</sup> Ćorić, D., Filetin, T.: Materijali u zrakoplovstvu, FSB, Zagreb, 2010., str. 123

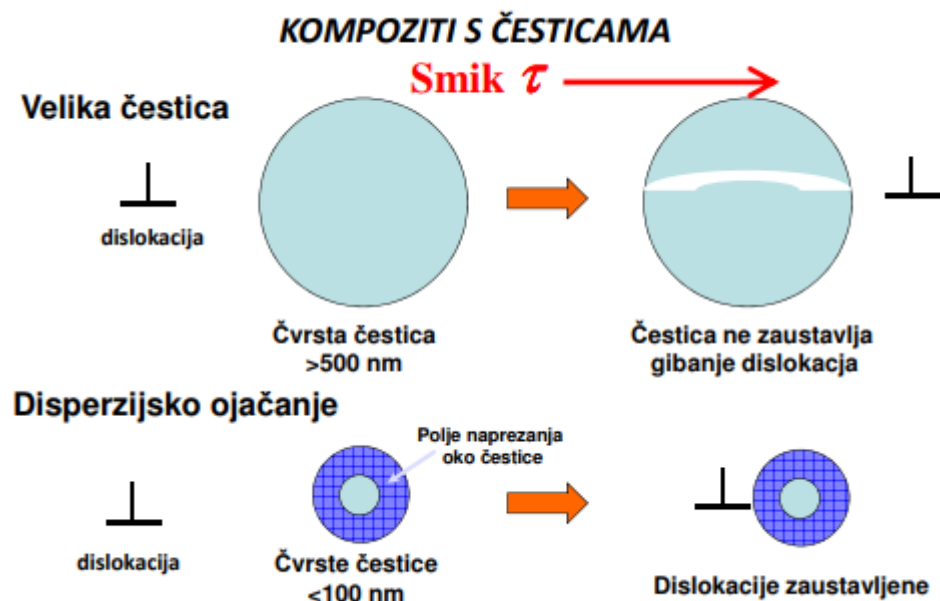
<sup>31</sup> Filetin, T., Kovačiček, F., Indof, J.: Svojstva i primjena materijala, FSB, Zagreb, 2011., str. 236

- Između matrice i raspršenog materijala treba postojati dobra povezanost. Slaba rastvorljivost raspršenog materijala u matrici može doprinijeti dobrim i čvrstim vezama.<sup>32</sup>

U zrakoplovstvu najvažniji kompozitni materijali ojačani disperziranim česticama su: Be-BeO kompozit koji se koristi za izradu svemirske tehnike, Ni-20%Cr-ThO<sub>2</sub> kompozit od kojeg se izrađuju dijelovi turbina i Pt-ThO<sub>2</sub> od kojeg su izrađene neke električne komponente.<sup>33</sup>

#### 4.2. Kompoziti s velikim česticama

Kompoziti s velikim česticama se razlikuju od onih s disperziranim česticama po tome što sadrže veće udjele čestica koje ne utječu na sprječavanje gibanja dislokacija. Ovi materijali proizvode se s kombinacijom svojstava čija primarna svrha nije osiguranje čvrstoće.<sup>34</sup> Na slici 6. prikazana je razlika između kompozita s velikim česticama i kompozita s disperzijom na osnovi sprječavanja gibanja dislokacija.



Slika 6. Razlika između kompozita s velikim česticama i ojačanih disperzijom  
Izvor: Marić, G.: Prezentacija s predavanja Materijali II, FSB, ak.god.2012./2013.

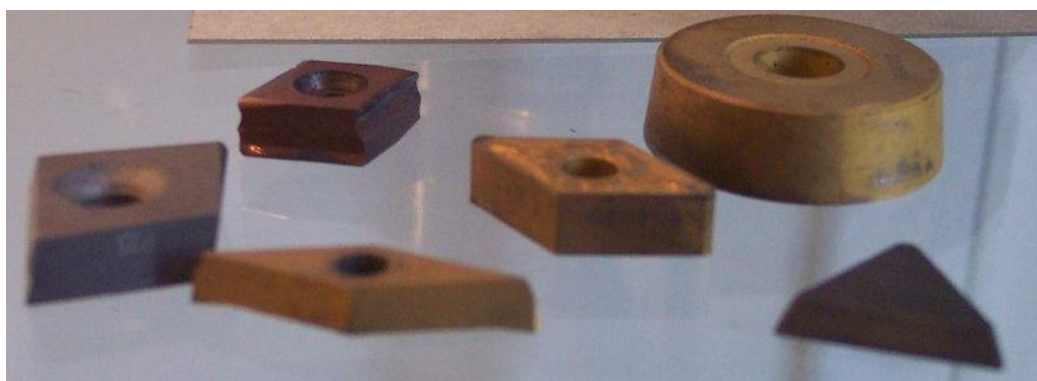
<sup>32</sup> Filetin, T., Kovačiček, F., Indof, J.: Svojstva i primjena materijala, FSB, Zagreb, 2011., str. 237

<sup>33</sup> Filetin, T., Kovačiček, F., Indof, J.: Svojstva i primjena materijala, FSB, Zagreb, 2011., str. 238

<sup>34</sup> Filetin, T., Kovačiček, F., Indof, J.: Svojstva i primjena materijala, FSB, Zagreb, 2011., str. 238

### 4.3. Primjena kompozita ojačanih česticama

Spajanjem keramičkih čestica i metalne matrice dobivaju se tvrdi metali. Primjer tvrdih metala je metal s volframovim karbidima koje povezuje kobalt. Tvrdi metali proizvode se tako da se smjesa volfram-karbida i kobalta preša u kompaktne pločice. Zatim se pločice zagrijevaju na temperaturu višu od tališta kobalta (temperatura više od  $1.400^{\circ}\text{C}$ ) i potom se hlade. Rezultat ovog procesa su tvrde i žilave pločice koje se koriste za izradu alata za rezanje koji su prikazani na slici 7.<sup>35</sup>



Slika 7. Tvrdi metali WC-Co

Izvor: [https://hr.wikipedia.org/wiki/Tvrdi\\_metal#Volframov\\_karbid](https://hr.wikipedia.org/wiki/Tvrdi_metal#Volframov_karbid)

Abrazivi ili ploče za rezanje i bušenje su inače izrađene od legura aluminijevog oksida ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ), silicijevog karbida ( $\text{SiC}$ ), borovog nitrda ( $\text{BN}$ ) i dijamanta. Žilavost abraziva se povećava povezivanjem dijamantnih čestica s metalnom matricom i povezivanjem ostalih spomenutih legura sa smjesom polimerne ili staklene matrice. Izuzetno je bitno da čestice i matrica budu dobro povezane kako se čestice ne bi otkidale od matrice prilikom uporabe. Također udjeli čestica moraju biti takvi da se istrošene čestice mogu zamijeniti novim abrazivnim česticama iz dubljih slojeva materijala.<sup>36</sup>

Srebro ojačano volframom je kompozitni materijal dobre tvrdoće, električne vodljivosti i otpornosti na trošenje te je kao takav pogodan za izradu električnih kontakata. Srebro je zaslužno za dobro provođenje električne struje, a volfram osigurava tvrdoću i otpornost na trošenje.<sup>37</sup>

<sup>35</sup> [https://hr.wikipedia.org/wiki/Tvrdi\\_metal#Volframov\\_karbid](https://hr.wikipedia.org/wiki/Tvrdi_metal#Volframov_karbid), srpanj 2017.

<sup>36</sup> Filetin, T., Kovačiček, F., Indof, J.: Svojstva i primjena materijala, FSB, Zagreb, 2011., str. 239

<sup>37</sup> Filetin, T., Kovačiček, F., Indof, J.: Svojstva i primjena materijala, FSB, Zagreb, 2011., str. 239

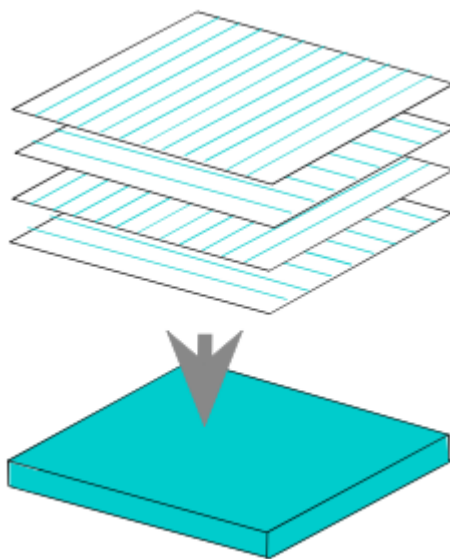


## 5. Složeni kompoziti

Složeni kompoziti su materijali čija svojstva ne ovise samo o svojstvima konstrukcijskih materijala, već ovise i o načinu slaganja, tj. geometrijskom rasporedu elemenata konstrukcije. Ovi kompoziti mogu se još nazvati i „strukturni“ kompoziti a u tu skupinu pripadaju slojeviti kompoziti materijali (laminati) i sendvič konstrukcije.

### 5.1. Slojeviti kompoziti (laminati)

Laminati su kompoziti konstruirani od čvrsto povezanih dvo-dimenzionalnih slojeva (ploča ili panela) s preferiranim smjerom visoke čvrstoće. Svojstva laminata su različita ovisno o smjeru opterećenja, ali ta razlika nije toliko značajna kao kod kompozita ojačanih jednosmjernim vlaknima. Prema namjeni materijala i smjeru djelovanja opterećenja izrađuju se kompoziti sa slojevima usmjerenim prema tim parametrima kako bi se osigurala najbolja svojstva. Na slici 8. je prikazan način slaganja laminata čiji su paneli različito usmjereni kako bi se dobilo svojstvo visoke čvrstoće u svim smjerovima.<sup>38</sup>



*Slika 8. Slaganje različito usmjerenih panela*

*Izvor: Marić, G.: Prezentacija s predavanja Materijali II, FSB, ak.god.2012./2013.*

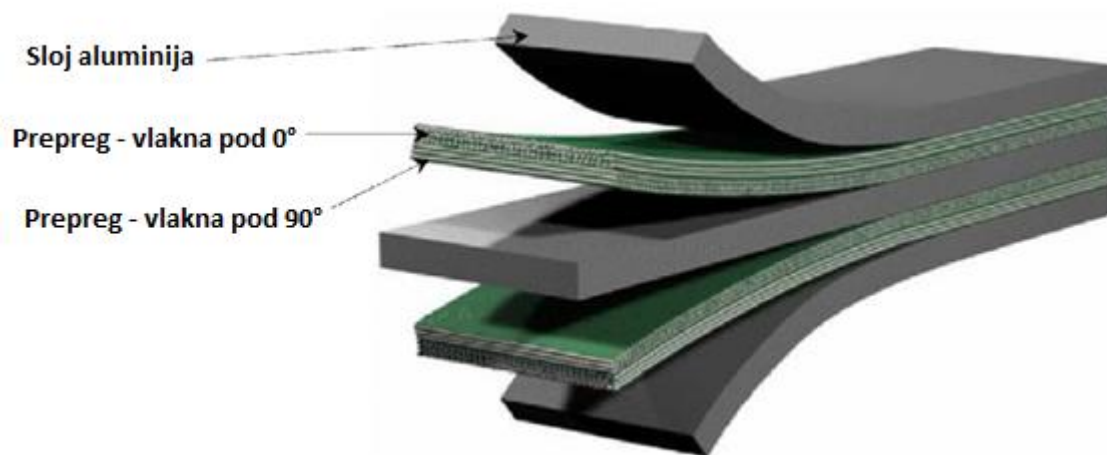
Slojeviti kompoziti proizvode se različitim metodama deformiranja i spajanja. Većina metalnih kompozita kao što su obloge i bimetali se proizvode spajanjem dvaju metala ili hladnim postupcima valjanja. Spajanje velikih metalnih ploča, koje zbog svojih dimenzija se ne mogu smjestiti u stroj za valjanje, se izvodi eksplozijom. Eksplozivno punjenje može izazvati tlak potreban za spajanje. Jednostavni laminati poput koaksijalnih kabela proizvode se koekstruzijom. Koekstruzija je postupak obavijanja tvrdih metala mekšim metalima uz primjenu odgovarajućih alata. Otvrdnjavanje ljepila kod slojevitih kompozita izvodi se prešanjem malih

<sup>38</sup> Marić, G.: Prezentacija s predavanja Materijali II, FSB, ak.god.2012./2013.



komponenti pod visokim tlakom i povišenoj temperaturi. Spajanje ploča također se može izvesti i lemljenjem. U tom slučaju metalne ploče se razmaknu i zagrijavaju malo iznad tališta legure koja služi za lemljenje, te se ta legura uvlači u raspor između ploča.<sup>39</sup>

U zrakoplovstvu najvažniji slojeviti kompozit je GLARE (engl. *Glass reinforced aluminium*). GLARE je kompozitni materijal od vlaknastog metalnog laminata (FML- Fiber Metal Laminate) koji se sastoji od vrlo tankih slojeva metala, najčešće aluminija. Metalni slojevi sadrže slojeve preprega od staklenih vlakana i čvrsto su spojeni matricom od epoksidne smole. Na slici 9. prikazana je slojevitost GLARE-a.<sup>40</sup>



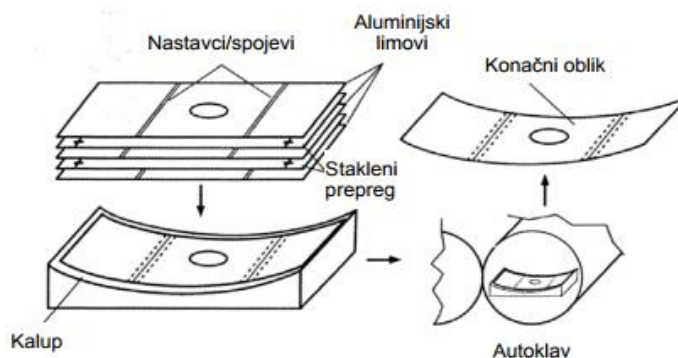
Slika 9. Slojevi GLARE-a

Izvor: [https://www.researchgate.net/figure/228578504\\_fig3\\_Figure-3-Built-up-of-Glare-Fibre-Metal-Laminate-From-an-engineering-point-of-view-FML](https://www.researchgate.net/figure/228578504_fig3_Figure-3-Built-up-of-Glare-Fibre-Metal-Laminate-From-an-engineering-point-of-view-FML), srpanj 2017.

GLARE se proizvodi tako da se nakon polaganja vlakana limovi međusobno spajaju i potom oblikuju u kalupima. U kalupu materijal je izložen povišenoj temperaturi i tlaku s ciljem da se polimerna smola omekša i čvrsto poveže metalne slojeve. Opisani proces je prikazan na slici 10. Mehanička svojstva ovakvog kompozita određena su smjerom orijentacije vlakana u pojedinim slojevima, te se zato kod ugradnje laminati moraju orijentirati tako da imaju najveću mehaničku otpornost u smjeru djelovanja najvećih vanjskih opterećenja.

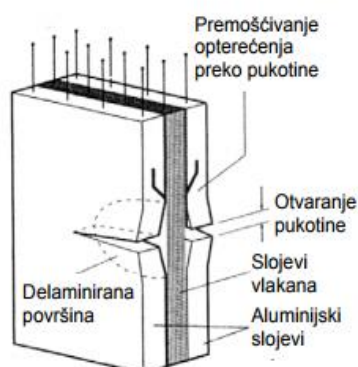
<sup>39</sup> Filetin, T., Kovačiček, F., Indof, J.: Svojstva i primjena materijala, FSB, Zagreb, 2011., str. 266

<sup>40</sup> <https://en.wikipedia.org/wiki/GLARE>, srpanj 2017.



Slika 10. Postupak oblikovanja GLARE kompozita  
Izvor: Ćorić, D., Filetin, T.: *Materijali u zrakoplovstvu*, FSB, Zagreb, 2010., str. 124

Prednost GLARE-a je viša čvrstoća i manja masa u odnosu na klasične aluminijske legure. Važno svojstvo GLARE laminata je otpornost na pukotine. Ako se u aluminijskim limovima javi pukotina snop staklenih vlakana premošćuje pukotinu i na taj način usporava njeno širenje. Na slici 11. je prikazano premošćivanje pukotine.<sup>41</sup> To svojstvo je izrazito bitno kod konstrukcije zrakoplova jer minimalizira moguće probleme zbog napuknuća dijelova.



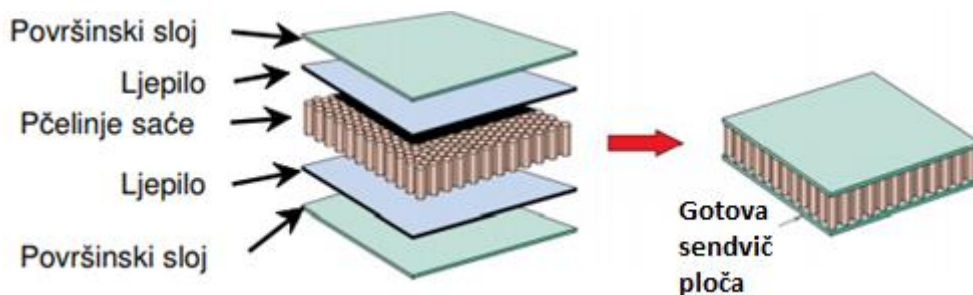
Slika 11. Premošćivanje opterećenja preko pukotine  
Izvor: Ćorić, D., Filetin, T.: *Materijali u zrakoplovstvu*, FSB, Zagreb, 2010., str. 124

## 5.2. Sendvič konstrukcije

Sendvič konstrukcije sastoje se od tankih vanjskih slojeva i laganog srednjeg dijela koji služi za popunjavanje. Materijal za popunjavanje i srednji sloj ne moraju biti čvrsti i kruti, ali će sendvič konstrukcija imati oba svojstva. Najpoznatiji primjer ovakve konstrukcije je valoviti karton. U zrakoplovstvu se najviše koriste sendvič konstrukcije u obliku pčelinjih saća. Kao što je prikazano na slici 12., ova konstrukcija se sastoji od površinskih slojeva i pčelinjih saća koje su najčešće tanki limovi, trake ili folije od aluminija oblikovane u šesterokutne ćelije usmjerene

<sup>41</sup> Ćorić, D., Filetin, T.: *Materijali u zrakoplovstvu*, FSB, Zagreb, 2010., str. 124

okomito na ravninu površinskih slojeva. Pčelinje saće i površinski slojevi se povezuju ljepilima.<sup>42</sup>



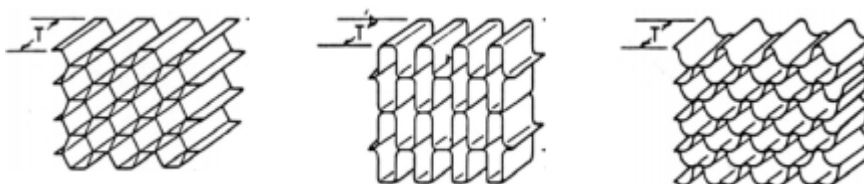
Slika 12. Slojevi sendvič konstrukcije

Izvor: Marić, G.: *Prezentacija s predavanja Mateijali II, FSB, ak.god.2012/13*

Kao materijali jezgre najviše se rabe sljedeći materijali:

- Polimerne pjene od polivinil-klorida (PVC), polistirena (PS), poliuretana (PUR), polieterimida (PEI), akrilne pjene; primjenjuju se pjene gustoće od 40 do 200 kg/m<sup>3</sup> i debljine od 5 do 50 mm;
- Aluminiij ili polimerni kompoziti (aramidna vlakna u kombinaciji s akrilnitril/butadien/stirenskom (ABS), polikarbonantom (PC), polipropilenskom (PP) i polietilenskom (PE) matricom) u izradi saća;
- Drvo (balza, cedar)

Jezgre od aluminiija se proizvode postupkom profiliranja. Profiliranje je provlačenje valjanih aluminijskih folija ili limova kroz profilirajuće valjke. Nakon toga oni se spajaju tvoreći strukturu sa šesterokutno oblikovanim ćelijama. Ovisno o načinu profiliranja oblici mogu biti drugačiji od onih klasičnih šesterokutnih. Primjeri saćastih jezgri prikazani su na slici 13. Površinski slojevi su izrađeni od materijala veće čvrstoće i krutosti. Najčešće su to legure aluminiija, polimerni kompoziti ojačani vlaknima, titanove legure i čelik.<sup>43</sup>



Slika 13. Oblici saćastih jezgri

Izvor: Ćorić, D., Filetin, T.: *Materijali u zrakoplovstvu, FSB, Zagreb, 2010., str. 124*

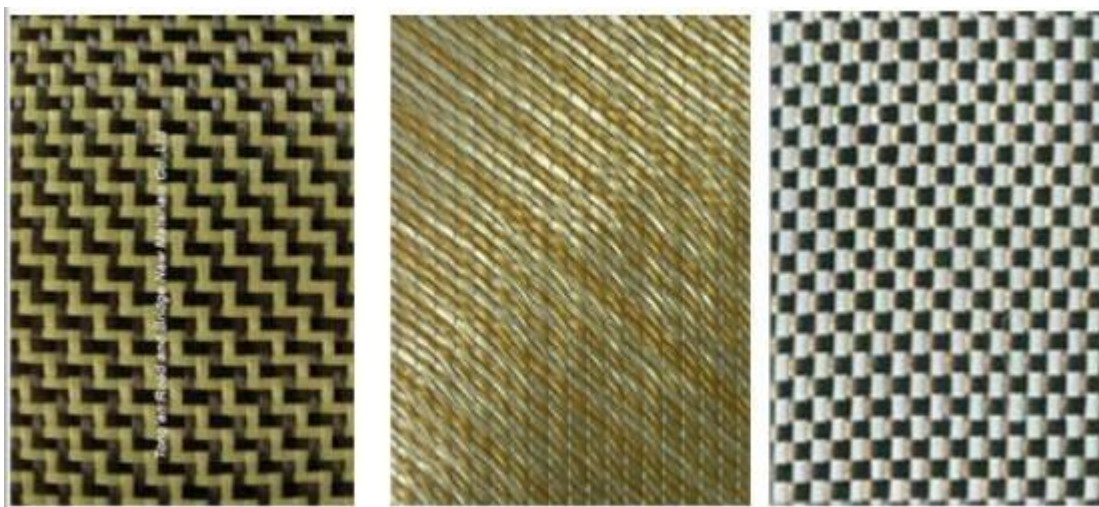
Sendviči s aluminijskom jezgrom u obliku pčelinjih saća primjenjuju se za izradu konstrukcijskih elemenata poput krila, trupa i repa zrakoplova. Za te dijelove zrakoplove izuzetno je bitno da budu čvrsti i kruti, a da su istovremeno male mase.

<sup>42</sup> Marić, G.: *Prezentacija s predavanja Mateijali II, FSB, ak.god.2012/13*

<sup>43</sup> Ćorić, D., Filetin, T.: *Materijali u zrakoplovstvu, FSB, Zagreb, 2010., str. 125*

## 6. Hibridni kompoziti

Hibridni kompoziti su relativno nova vrsta vlaknima ojačanih kompozita. Ono što ih razlikuje od „običnih“ kompozita ojačanih vlaknima je to što oni unutar jedinstvene matrice imaju više vrsta vlakana. Takvi kompoziti imaju znatno bolju kombinaciju svojstava koja mogu biti vrlo različita ovisno o načinu slaganja vlakana u matrici. Vlakna mogu biti raspoređena u jednom smjeru ili orijentirana u različitim smjerovima, a laminati se mogu slagati iz različitih slojeva pri čemu je svaki sloj sastavljen od drugog tipa ojačala. Najčešće se koriste ugljična i staklena vlakna u polimernoj matrici. Ugljična vlakna karakteriziraju visoka čvrstoća i krutost, te niska gustoća, dok staklena vlakna imaju nešto lošija mehanička svojstva i mnogo su jeftinija od ugljičnih. Rezultat spajanja ove dvije vrste vlakana je kompozit dobrih mehaničkih svojstava i niske cijene.<sup>44</sup> Slika 14. prikazuje najčešće korištene kombinacije vlakna. Na slici s lijeve strane vidi se kombinacija ugljičnih i aramidnih vlakna. Njihova karakteristična svojstva su dobra žilavost i vlačna čvrstoća, niska gustoća ali i relativno visoka cijena. U sredini su prikazana aramidna i staklena vlakna. Od aramida ovaj kompozit poprima svojstva male gustoće, dobre žilavosti i vlačne čvrstoće, a od stakla poprima svojstva dobre tlačne i vlačne čvrstoće i niske cijene. Na desnoj slici su ugljična i staklena vlakna koja od ugljika dobivaju svojstva dobre tlačne i vlačne čvrstoće, dobre krutosti i male gustoće. Zbog stakla je cijena ovog kompozita relativno niska.<sup>45</sup>



*Slika 14. Kombinacije vlakana kod hibridnih kompozita*  
*Izvor: Marić, G.: Prezentacija s predavanja Mateijali II, FSB, ak.god.2012/13*

<sup>44</sup> Filetin, T., Kovačiček, F., Indof, J.: Svojstva i primjena materijala, FSB, Zagreb, 2011., str. 258

<sup>45</sup> Marić, G.: Prezentacija s predavanja Mateijali II, FSB, ak.god.2012/13

Danas se sve više traže drugačija rješenja koja bi smanjila troškove izrade i eksploatacije materijala čemu mnogo pridonosi razvoj hibridnih materijala. Novost koja se pojavila kod hibridnih kompozita je zamjena staklenih vlakana u polimernim matricama sa biokompozitima. Hibridni biokompoziti pokazuju strukturnu i funkcionalnu stabilnost tijekom skladištenja i uporabe, a ipak su osjetljivi na degradaciju okolišta prilikom odlaganja. Prilikom izrade hibridnih biokompozita mogu se koristiti kombinacije sintetičkih i prirodnih vlakana (biovlakna) ili kombinacije dvije vrste prirodnih vlakana unutar matrice.<sup>46</sup> Biovlakna mogu biti biljnog (vlakna drveta, trave, slame, lišće, sjeme, voće, itd.) ili životinjskog podrijetla (vuna, dlaka, svila, itd.). Ova vrsta materijala ima mnoge prednosti poput široke dostupnosti, niske cijene, male gustoće, visoke čvrstoće i krutosti, visoke električne vodljivosti, dobre zvučne izolacije i sigurniji su za rukovanje i proizvodnju. Nedostaci hibridnih biokompozita su osjetljivost na degradaciju, dimanzije vlakana i mehanička svojstva variraju s obzirom na podrijetlo vlakana, vlakna su teško rasprišiva u matrici, upijaju vlagu i počinju degradirati na temperaturama u rasponu od 90°C do 200°C. Potrebno je unaprijediti mehanička svojstva kako bi prirodna vlakna mogla u potpunosti zamijeniti staklena vlakna i imati primjenu u konstrukcijskim aplikacijama. Hibridni biokompoziti mogu se proizvesti na slijedeće načine: oblikovanje naštrcavanjem, ručno polaganje (automatsko lamiranje), pultrudiranje (40-70% ojačala), RTM (engl. *Resin Transfere Moulding*), namatanje (engl. *Filament Winding*) i prepreg. Ova vrsta materijala još nije dovoljno unaprijeđena da bi bila korištena u zrakoplovnoj industriji, ali se sada već koristi kod izrade dijelova automobila, bicikala i brodova.<sup>47</sup>

---

<sup>46</sup> [https://www.researchgate.net/publication/30511845\\_Hybrid\\_composites](https://www.researchgate.net/publication/30511845_Hybrid_composites), kolovoz 2017.

<sup>47</sup> [https://www.fsb.unizg.hr/usb\\_frontend/files/1426604989-0-pred6.pdf](https://www.fsb.unizg.hr/usb_frontend/files/1426604989-0-pred6.pdf), kolovoz 2017.



## 7. Primjena kompozitnih materijala na suvremenim zrakoplovima

Ubrzani rast zračnog prometa postavlja nove zahtjeve za unaprjeđenje zrakoplova. Suvremeni zrakoplovi sada trebaju biti veći, sigurniji, prelaziti velike udaljenosti i biti što više ekološki prihvatljivi. Zbog potrebe za ispunjavanjem svih navedenih uvjeta, u proizvodnji zrakoplova počeli su se koristiti kompozitni materijali. Kompozitni materijali su lakši od onih konvencionalnih i time omogućavaju konstruiranje zrakoplova koji su veći i mogu prevoziti mnogo više putnika i tereta na većim udaljenostima. Iz istog razloga suvremeni zrakoplovi napravljeni od kompozitnih materijala troše manje goriva što ih čini ekonomičnijima i ekološki prihvatljivima. Primjeri modernih zrakoplova čije su konstrukcije velikim udjelom od kompozitnih materijala su Airbus A380 i Boeing B787 kao putnički zrakoplov, te Lockheed Martin F-35 Lightning II kao vojni. Tvrtka Pipistrel poznata je po proizvodnji malih laganih zrakoplova koji su gotovo u cijelosti napravljeni od kompozitnih materijala.

### 7.1. Airbus A380

Airbus A380 (slika 15.) najveći je širokotrupni putnički zrakoplov s dvije palube. Razvoj ovog zrakoplova započeo je 1990. godine, a početna ideja je bila napraviti konkurentni zrakoplov tadašnjem najvećem Boeingu 747. Dizajn zrakoplova s dvije velike palube čiji bi operativni troškovi bili do 20% manji nego B747 prezentiran je 1994. godine pod nazivom A3XX. Kasnije zrakoplov dobiva ime A380 i prvi put polijeće 27. travnja 2005. godine. Ukupni troškovi realiziranja ovog projekta iznose 25 milijardi dolara. U komercijalnu uporabu ulazi 25. listopada 2007. godine za Singapore Airlines. Do sada je naručeno 317 zrakoplova, a isporučeno ih je 213.<sup>48</sup>



Slika 15. Airbus A380

Izvor: <http://helicecluster.com/aero/airbus-a380.htm>, srpanj 2017.

<sup>48</sup> [https://en.wikipedia.org/wiki/Airbus\\_A380](https://en.wikipedia.org/wiki/Airbus_A380), srpanj 2017.

Duljina ovog zrakoplova iznosi 72,75 m, širina trupa 24,08 m, a razmah krila 79,8 m. A380 pokreću četiri motora Rolls-Royce Trent snage 374 kN. Najveća brzina koju može postići je 1.020 km/h, a brzina krstarenja iznosi 900 km/h. Maksimalni dolet je 14.800 km, a maksimalna visina leta 13.100 m.<sup>49</sup> Podaci o masama ovog zrakoplova dani su u tablici 3.

Tablica 3. Operativne mase zrakoplova A380

Najveća masa u polijetanju	560.000 kg
Najveća masa u slijetanju	386.000 kg
Najveća masa bez goriva	361.000 kg
Najveći kapacitet goriva	320.000 l
Masa praznog zrakoplova	277.000 kg

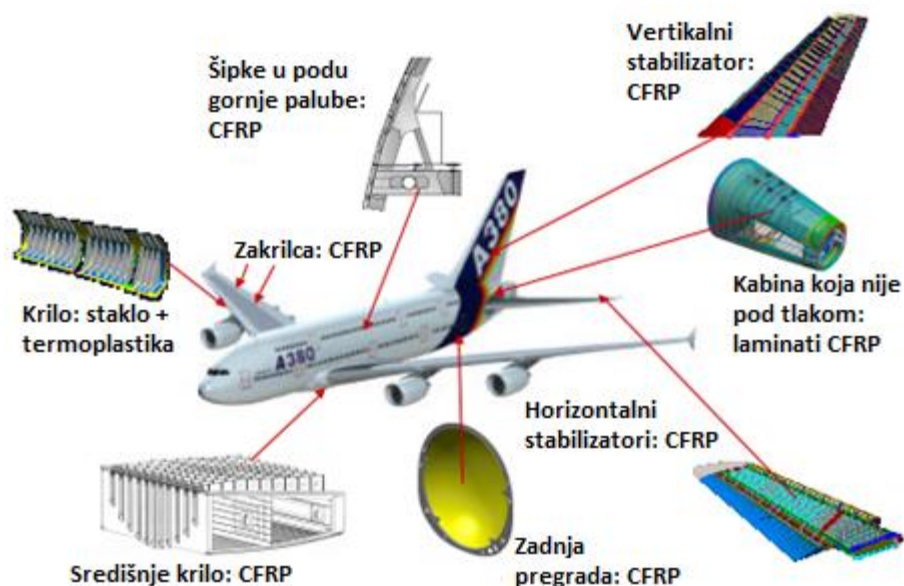
Izvor: <http://www.modernairliners.com/airbus-a380/airbus-a380-specs/>, srpanj 2017.

Prilikom izbora najprikladnijeg materijala za ovaj specifični zrakoplov najviše se pažnje pridavalo dobivanju najlakše moguće strukture. U tu svrhu najbolji izbor su bili kompozitni materijali. Jedan od uvjeta je i standardizacija materijala korištenih na svim dijelovima zrakoplova što uvelike pomaže u proizvodnji i održavanju zrakoplova.

A380 prvi je zrakoplov čiji su središnji dijelovi krila konstruirani od kompozitnog materijala CFRP (engl. *Carbon Fiber Reinforced Plastic* – Plastika ojačana ugljičnim vlaknima). Korištenjem kompozitnih materijala krila zrakoplova su lakša za 1,5 tonu. Ukupna masa središnjeg krila je 8,8 tona, a od toga 5,3 tone su kompozitni materijali. Najveća prepreka bila je spajanje krila s trupom zrakoplova gdje su kompozitne komponente mogle biti debljine do 45 mm. Da bi se riješio ovaj problem korištene su kompozitne šipke od istog kompozitnog materijala debljine 23 mm i duljine 16 m. CFRP šipke prvi su bile korištene na zrakoplovu A340-600 i svaka šipka može nositi masu od 450 tona. Od istog materijala konstruirani su vertikalni i horizontalni stabilizatori, kormilo i šipke u podu gornje palube. Prednja ivica krila je proizvedena od termoplastike što je olakšalo proizvodnju i ugradnju te smanjilo troškove i težinu. Na slici 16. su prikazani dijelovi izrađeni od CFRP kompozitnog materijala.<sup>50</sup>

<sup>49</sup> <http://www.airliners.net/aircraft-data/airbus-a380/29>, srpanj 2017.

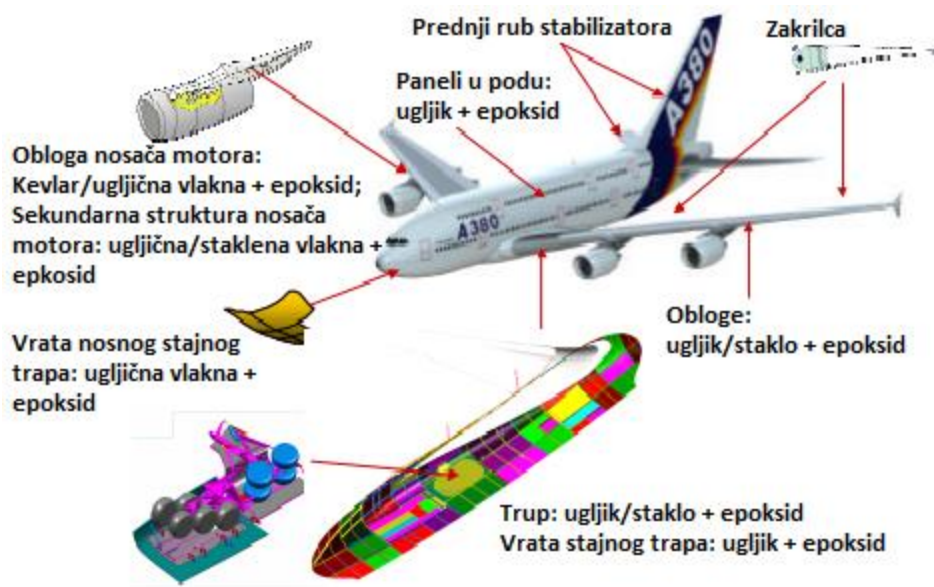
<sup>50</sup> Jerome Pora: *Composite materials of Airbus A380 -From History to Future-*, Airbus, Large Aircraft Division



Slika 16. CFRP kompoziti na dijelovima A380

Izvor: Jerome Pora: *Composite materials of Airbus A380 -From History to Future-*, Airbus, Large Aircraft Division

Mnogi dijelovi Airbusa A380 su izrađeni od sendvič konstrukcija, tj. strukture u obliku pčelinjih saća kao što je prikazano na slici 17. Trup zrakoplova i zakrilca načinjeni su od spoja ugljičnih i staklenih vlakana unutar epoksidne smole, paneli podova od epoksidne smole s ugljikom, nosači motora od kombinacije Kevlar i ugljičnih vlakana u epoksidu, te vrata od prednjeg stajnog trapa od ugljičnih vlakana u epoksidu.



Slika 17. Dijelovi A380 od sendvič konstrukcija

Izvor: Jerome Pora: *Composite materials of Airbus A380 -From History to Future-*, Airbus, Large Aircraft Division



## 7.2. Boeing 787 Dreamliner

B787 (Slika 18.) najnoviji je zrakoplov američke kompanije Boeing. Glavni Boeingov cilj bio je izgraditi zrakoplov sa što većom iskoristivosti goriva. Zato su u proizvodnji korišteni suvremeni kompozitni materijali koji bi smanjili ukupnu težinu zrakoplova. Unatoč tome prvih šest proizvedenih zrakoplova bilo je smatrano preteškima, bili su do 2.300 kg teži od predviđene mase. Zbog toga su neki dijelovi redizajnirani na način da se u proizvodnji više koristio titanij, ali to je znatno poskupilo cijenu zrakoplova. Projekt je osmišljen 2003. godine, a proizvodnja prvog B787 započela je u svibnju 2007. godine. Zbog nekoliko tehničkih problema probni let je bio odgađan više puta. Nakon opsežnih testiranja na zemlji, prvi probni let je izveden 15. prosinca 2009. godine. Prvi komercijalni let za zračnog prijevoznika All Nippon Airways izveden je 28. rujna 2011. godine. Do danas naručeno je oko 500 ovih zrakoplova, a 275 ih je isporučeno.<sup>51</sup>



Slika 18. Boeing B787 Dreamliner

Izvor: [https://en.wikipedia.org/wiki/Boeing\\_787\\_Dreamliner](https://en.wikipedia.org/wiki/Boeing_787_Dreamliner), srpanj 2017.

Dreamliner je širokotrupni zrakoplov s dva Rolls-Royce Trent 1000 ili GENx motora. Razmah krila iznosi 60,1 m, duljina trupa 56,7 m i širina trupa 5,97 m. Maksimalna brzina koju ovaj zrakoplov može postići iznosi 954 km/h, a brzina krstarenja 913 km/h. Najveći mogući dolet je 15.200 km. Operativne mase zrakoplova prikazane su u tablici 4.<sup>52</sup>

<sup>51</sup> [https://en.wikipedia.org/wiki/Boeing\\_787\\_Dreamliner](https://en.wikipedia.org/wiki/Boeing_787_Dreamliner), srpanj 2017.

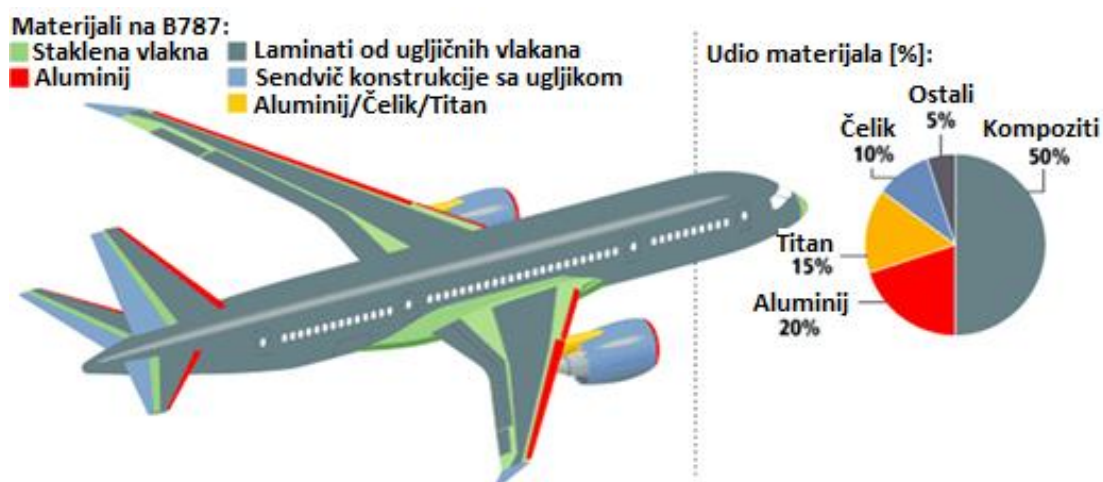
<sup>52</sup> <http://www.modernairliners.com/boeing-787-dreamliner/boeing-787-dreamliner-specs/>, srpanj 2017.

Tablica 4. Operativne mase Boeinga B787

Najveća masa polijetanju	228.000 kg
Najveća masa u slijetanju	172.000 kg
Najveća masa bez goriva	161.000 kg
Najveći kapacitet goriva	126.210 l
Masa praznog zrakoplova	118.000 kg

Izvor: <http://www.modernairliners.com/boeing-787-dreamliner/boeing-787-dreamliner-specs/>, srpanj 2017

Prilikom konstrukcije Boeinga 787 korišteno je mnogo više kompozitnih materijala nego kod bilo kojeg drugog Boeingovog zrakoplova. Gotovo polovica zrakoplova je izrađena od plastike ojačane karbonskim vlaknima i drugih kompozitnih materijala. S obzirom na radno okruženje i opterećenje koje svaka pojedina komponenta ima tijekom životnog vijeka karoserije birani su optimalni materijali. Trup zrakoplova izrađen od kompozita zahtjeva manje održavanja nego trup izrađen od aluminija zbog manje osjetljivosti na opterećenja.<sup>53</sup> Posljedica provođenja brojnih istraživanja i analiza je odabir materijala koji pružaju najniže operativne troškove. Laminati s ugljikom korišteni su za izradu cijelog trupa zrakoplova, središnja krila, zakrilca i središnje dijelove vertikalnog i horizontalnih stabilizatora. Sendvič konstrukcije s ugljikom korištene su za izradu wingleta, kormila, trimera i nosača motora zrakoplova. Od fibreglassa su napravljeni spojevi krila s trupom. Od ostalih materijala na B787 korišteni su aluminij (20 % od ukupne težine materijala), titanij (15%) i čelik (10%). Svi materijali su prikazani na slici 19.<sup>54</sup>



Slika 19. Materijali na Boeingu 787

Izvor: <http://www.modernairliners.com/wp-content/uploads/2015/07/Boeing-787-Dreamliner-construction-materials.png>, srpanj 2017.

<sup>53</sup> [http://www.boeing.com/commercial/aeromagazine/articles/qtr\\_4\\_06/article\\_04\\_2.html](http://www.boeing.com/commercial/aeromagazine/articles/qtr_4_06/article_04_2.html), srpanj 2017.

<sup>54</sup> <http://www.boeing.com/commercial/787/by-design/#/advanced-composite-use>, srpanj 2017.

Upravo zbog toga ovaj zrakoplov daleko je lakši od najprodavanijeg Boeingovog modela 777 kod kojeg je udio kompozitnih materijala samo 12% te su teški materijali daleko više zastupljeniji te njihovi postoci iznose: aluminij 50% i drugi materijali poput titanija i čelika 38%.<sup>55</sup>

### 7.3. Lockheed Martin F-35 Lightning II

F-35 (slika 20.) je borbeni zrakoplov nove generacije s jednim sjedalom i jednim motorom. Razvoj ovog zrakoplova započelo je 1992. godine, a planira se da ću u punoj proizvodnji biti 2018. Prvi puta je poletio 15. prosinca 2006. godine. Primarna namjena mu je zračna obrana. Opremljen je najsuvremenijom tehnologijom poput sintetičkim otvorima radarske tehnike integracije i naprednim ciljanim prepoznavanjem.<sup>56</sup>



Slika 20. Lockheed Martin F-35 Lightning II

Izvor: [https://en.wikipedia.org/wiki/Lockheed\\_Martin\\_F-35\\_Lightning\\_II](https://en.wikipedia.org/wiki/Lockheed_Martin_F-35_Lightning_II), srpanj 2017.

Strukturni kompoziti u F-35 čine 35% težine zrakoplova, više nego kod starije generacije borbenih zrakoplova F-22 (25%). Većina kompozitnih materijala su bismaleimidi (BMI) i kompozitni i epoksidni materijali. Također, F-35 bit će prvi zrakoplov koji se biti konstruiran od strukturnih nano kompozita, to jest epoksidnih smola ojačanih ugljičnim nano cjevčicama. Problemi s korozijom riješeni su korištenjem punila koja pomažu u sprječavanju galvanske korozije.<sup>57</sup>

<sup>55</sup> <http://www.modernairliners.com/boeing-787-dreamliner/boeing-787-dreamliner-specs/>, srpanj 2017.

<sup>56</sup> [https://en.wikipedia.org/wiki/Lockheed\\_Martin\\_F-35\\_Lightning\\_II](https://en.wikipedia.org/wiki/Lockheed_Martin_F-35_Lightning_II), srpanj 2017.

<sup>57</sup> [https://en.wikipedia.org/wiki/Lockheed\\_Martin\\_F-35\\_Lightning\\_II](https://en.wikipedia.org/wiki/Lockheed_Martin_F-35_Lightning_II), srpanj 2017.

#### 7.4. Zrakoplovi Pipistrel

Pipistrel d.o.o. je slovenski proizvođač lakih zrakoplova osnovan 1989. godine sa sjedištem u Ajdovščini. Do danas Pipistrel je proizveo više od 1500 zrakoplova. Primjenom kompozitnih materijala razvili su zrakoplove izvrsnih performansi i malih operativnih troškova i troškova održavanja.<sup>58</sup>

Pipistrel Panthera je zrakoplov s četiri sjedala koji troši 40% manje goriva, a pritom je brz i dostiže velike udaljenosti. Motori ovog zrakoplova mogu biti obični (benzinski), hibridni ili električni. Panthera može dostići brzinu od 370 km/h s potrošnjom od 38 litara benzinskog goriva na sat, te je dolet 1 900 km. Preciznim aerodinamičkim oblikovanjem, laganom kompozitnom strukturom, proporcionalnim elisama i posebnom izvedbom ispušnog sustava ovaj zrakoplov postiže nenadmašnu učinkovitost. Najveći dio strukture zrakoplova (95 %) izrađen je od kompozitnih materijala s ugljičnim vlaknima, antistatičkim materijalima i Kevlar vlaknima. Podvozje se može podići i izrađeno je od titanija što ga čini izuzetno čvrstim.<sup>59</sup> Pipistrel Panther prikazana je na slici 21.



Slika 21. Pipistrel Panthera

Izvor: <http://www.pipistrel.si/plane/panthera/overview>, , srpanj 2017.

<sup>58</sup> <http://www.pipistrel.si/>, , srpanj 2017.

<sup>59</sup> <http://www.pipistrel.si/plane/panthera/overview>, srpanj 2017.

## 8. Zaključak

Razvojem i primjenom kompozitnih materijala uvelike se pridonosi unaprjeđenju suvremenih zrakoplova. Otvaraju se mogućnosti da zrakoplovi postaju veći, brži, mogu prevesti više ljudi i imaju veće dolete. Samim time postaju ekonomičniji u smislu samog prijevoza, ali i održavanja.

Čimbenik kojem se u današnjem svijetu pridodaje veliki značaj je ekološka prihvatljivost. Da bi zrakoplovi trošili manje goriva moraju biti lakši i agilniji. U postizanju toga najviše doprinose kompozitni materijali. To su materijali nastali spajanjem dva ili više različitih materijala dobivajući njihova najbolja svojstva.

Kompozitni materijali s polimernim matricama ojačanim ugljičnim vlaknima jedan su od najčešće korištenih materijala u svrhu postizanja lagane konstrukcije koja je dovoljno čvrsta, elastična i otporna na lomove. Taj materijal zamjenjuje do sada korištene konvencionalne materijale kao što su aluminij i čelik. Nedostatak kompozita je njihova cijena. Inovativni kompoziti poput ugljik-ugljik kompozita pokazuju izvrsna svojstva, ali je njihova cijena izrazito visoka. Kako bi cijena takvih materijala postala prihvatljiva miješaju se s nešto jeftinijim materijalima poput aluminija ili stakla u svrhu dobivanja kompozita izvrsnih svojstava i prihvatljive cijene.

Zrakoplovna industrija teži potpunom prelasku na konstrukcije od kompozitnih materijala. S tim ciljem nastale su male letjelice poput Pipistrel Panthere čiji je udio kompozita od ukupne težine materijala 95%. Zrakoplovi za komercijalnu upotrebu još su uvijek jednim dijelom ovisni o konvencionalnim materijalima. Najveći napredak može se uočiti na primjeru Boeingovih zrakoplova. Jedan od najvećih njihovih zrakoplova koji se i danas uvelike koristi, model B777, ima udio od 12% kompozita od ukupne težine materijala. Najnoviji Boeingov komercijalni zrakoplov B787 sadrži 50% kompozita od ukupne težine materijala. Sličnosti koje dijele ovi zrakoplovi su to što su oba širokotrupni zrakoplovi, dugog doleta i mogućnosti prevoženja više stotina ljudi. Razlikuju ih činjenice da Boeing B787 troši mnogo manje goriva, tiši je i troškovi održavanja su mnogo manji. Na njihovom primjeru jasno se očituju poboljšanja koje su kompozitni materijali uveli u zrakoplovnu industriju.

## Literatura

1. Filetin, T., Kovačiček, F., Indof, J.: *Svojstva i primjena materijala*, FSB, Zagreb, 2011.
2. Steiner, S., Vidović, A., Bajor, I., Pita, O., Štimac, I.: *Zrakoplovna prijevozna sredstva*, FPZ, Zagreb, 2008.
3. Ćorić, D., Filetin, T.: *Materijali u zrakoplovstvu*, FSB, Zagreb, 2010.
4. Marić, G.: *Prezentacija s predavanja Materijali II*, FSB, ak.god.2012/2013
5. Jerome Pora: *Composite materials of Airbus A380 -From History to Future-*, Airbus, Large Aircraft Division
6. [https://hr.wikipedia.org/wiki/Tvrđi\\_metal#Volframov\\_karbid](https://hr.wikipedia.org/wiki/Tvrđi_metal#Volframov_karbid), srpanj 2017.
7. <https://en.wikipedia.org/wiki/GLARE>, srpanj 2017.
8. [https://en.wikipedia.org/wiki/Airbus\\_A380](https://en.wikipedia.org/wiki/Airbus_A380), srpanj 2017.
9. <http://www.airliners.net/aircraft-data/airbus-a380/29>, srpanj 2017.
10. <http://www.modernairliners.com/airbus-a380/airbus-a380-specs/>, srpanj 2017.
11. [https://en.wikipedia.org/wiki/Boeing\\_787\\_Dreamliner](https://en.wikipedia.org/wiki/Boeing_787_Dreamliner), srpanj 2017.
12. <http://www.modernairliners.com/boeing-787-dreamliner/boeing-787-dreamliner-specs/>, srpanj 2017.
13. [http://www.boeing.com/commercial/aeromagazine/articles/qtr\\_4\\_06/article\\_04\\_2.html](http://www.boeing.com/commercial/aeromagazine/articles/qtr_4_06/article_04_2.html), srpanj 2017.
14. <http://www.boeing.com/commercial/787/by-design/#/advanced-composite-use>, srpanj 2017
15. <http://www.modernairliners.com/boeing-787-dreamliner/boeing-787-dreamliner-specs/>, srpanj 2017.
16. [https://en.wikipedia.org/wiki/Lockheed\\_Martin\\_F-35\\_Lightning\\_II](https://en.wikipedia.org/wiki/Lockheed_Martin_F-35_Lightning_II), srpanj 2017.
17. <http://www.pipistrel.si/>, srpanj 2017.
18. <http://www.pipistrel.si/plane/panthera/overview>, srpanj 2017
19. [https://www.researchgate.net/publication/30511845\\_Hybrid\\_composites](https://www.researchgate.net/publication/30511845_Hybrid_composites), kolovoz 2017.
20. [https://www.fsb.unizg.hr/usb\\_frontend/files/1426604989-0-pred6.pdf](https://www.fsb.unizg.hr/usb_frontend/files/1426604989-0-pred6.pdf), kolovoz 2017.
21. [http://www.ae.metu.edu.tr/~ae469/Advantages%20and%20Disadvantages%20of%20Composite%20Materials\\_Resin%20Systems.pdf](http://www.ae.metu.edu.tr/~ae469/Advantages%20and%20Disadvantages%20of%20Composite%20Materials_Resin%20Systems.pdf), kolovoz 2017.



## Popis slika

Slika 1. Osnovni tipovi kompozita: (a) kompoziti s česticama; (b) kompoziti s vlaknima; (c) slojeviti kompoziti .....	4
Slika 2. Rasporedi vlaknastih ojačala .....	6
Slika 3. Postupci lijevanja materijala: (a) kapilarno djelovanje, (b) tlačno lijevanje, (c) vakuumsko infiltriranje, (d) kontinuirano lijevanje .....	12
Slika 4. Postupak pulturdiranja .....	13
Slika 5. Načini namotavanja vlakana .....	14
Slika 6. Razlika između kompozita s velikim česticama i ojačanih disperzijom .....	16
Slika 7. Tvrdi metali WC-Co.....	17
Slika 8. Slaganje različito usmjerenih panela.....	18
Slika 9. Slojevi GLARE-a .....	19
Slika 10. Postupak oblikovanja GLARE kompozita.....	20
Slika 11. Premošćivanje opterećenja preko pukotine .....	20
Slika 12. Slojevi sendvič konstrukcije .....	21
Slika 13. Oblici sačastih jezgri .....	21
Slika 14. Kombinacije vlakana kod hibridnih kompozita .....	22
Slika 15. Airbus A380 .....	24
Slika 16. CFRP kompoziti na dijelovima A380.....	26
Slika 17. Dijelovi A380 od sendvič konstrukcija .....	26
Slika 18. Boeing B787 Dreamliner .....	27
Slika 19. Materijali na Boeingu 787 .....	28
Slika 20. Lockheed Martin F-35 Lighting II.....	29
Slika 21. Pipistrel Panthera.....	30

## Popis grafikona

Grafikon 1. Prikaz vlačne čvrstoće različitih vrsta matrica ..... 7

Grafikon 2. Prikaz modula elastičnosti različitih vrsta matrica ..... 8

## Popis tablica

Tablica 1. Vrijednosti svojstava nekih ojačivača ..... 9

Tablica 2. Svojstva vlakana ..... 11

Tablica 3. Operativne mase zrakoplova A380 ..... 25

Tablica 4. Operativne mase Boeinga B787 ..... 28



## METAPODACI

**Naslov rada:** Primjena naprednih kompozitnih materijala u konstrukciji zrakoplova

**Autor:** Stella Šimunić

**Mentor:** izv. prof. dr. sc. Andrija Vidović

**Naslov na drugom jeziku (engleski):**

Application of advanced composite materials in aircraft structures

**Povjerenstvo za obranu:**

- prof. dr. sc. Sanja Steiner predsjednik
- izv. prof. dr. sc. Andrija Vidović mentor
- Arijana Modić, mag. ing. traff. član
- doc. dr. sc. Ružica Škurla Babić zamjena

**Ustanova koja je dodijelila akademski stupanj:** Fakultet prometnih znanosti  
Sveučilišta u Zagrebu

**Zavod:** Zavod za zračni promet

**Vrsta studija:** Preddiplomski

**Studij:** Promet

**Datum obrane završnog rada:** \_\_ . rujan 2017.



Sveučilište u Zagrebu  
Fakultet prometnih znanosti  
10000 Zagreb  
Vukelićeva 4

### IZJAVA O AKADEMSKOJ ČESTITOSTI I SUGLASNOST

Izjavljujem i svojim potpisom potvrđujem kako je ovaj \_\_\_\_\_ završni rad  
isključivo rezultat mog vlastitog rada koji se temelji na mojim istraživanjima i oslanja se na  
objavljenu literaturu što pokazuju korištene bilješke i bibliografija.  
Izjavljujem kako nijedan dio rada nije napisan na nedozvoljen način, niti je prepisan iz  
necitiranog rada, te nijedan dio rada ne krši bilo čija autorska prava.  
Izjavljujem također, kako nijedan dio rada nije iskorišten za bilo koji drugi rad u bilo kojoj drugoj  
visokoškolskoj, znanstvenoj ili obrazovnoj ustanovi.  
Svojim potpisom potvrđujem i dajem suglasnost za javnu objavu \_\_\_\_\_ završnog rada  
pod naslovom \_\_\_\_\_

#### **Primjena naprednih kompozitnih materijala u konstrukciji zrakoplova**

na internetskim stranicama i repozitoriju Fakulteta prometnih znanosti, Digitalnom akademskom  
repozitoriju (DAR) pri Nacionalnoj i sveučilišnoj knjižnici u Zagrebu.

U Zagrebu, 28.8.2017 \_\_\_\_\_

Student/ica:  
Šumac S.  
(potpis)